



**Уральский
федеральный
университет**

имени первого Президента
России Б. Н. Ельцина

**Институт естественных наук
и математики**

В. А. ЗАХАРОВ

А. С. ВОЛЕГОВ

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Часть 1

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И ВОПРОСЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Учебное пособие

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ПЕРВОГО ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б. Н. ЕЛЬЦИНА

В. А. Захаров, А. С. Волегов

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Учебное пособие

В двух частях

Часть 1

Принципы построения и вопросы стандартизации
автоматизированных измерительных систем

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
в качестве учебного пособия для студентов вуза,
обучающихся по направлению подготовки
27.03.01, 27.04.01 «Стандартизация и метрология»

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2018

УДК 006.9:681.518.3(075.8)

ББК 30.10-05я73

3-38

Под общей редакцией *В. А. Захарова*

Рецензенты:

секция научно-технического совета

Уральского научно-исследовательского института метрологии
(заместитель председателя секции *А. А. Ахмеев*);

Г. Л. Штрапенин, кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Электрические машины»

Уральского государственного университета путей сообщения

Захаров, В. А.

3-38 Метрологическое обеспечение измерительных систем : учеб.
пособие : в 2 ч. Ч. 1. Принципы построения и вопросы стандар-
тизации автоматизированных измерительных систем / В. А. Заха-
ров, А. С. Волегов ; [под общ. ред. В. А. Захарова] ; М-во науки
и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екате-
ринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 168 с.

ISBN 978-5-7996-2448-4

ISBN 978-5-7996-2449-1 (часть 1)

Учебное пособие содержит базовые понятия метрологии и рассмат-
ривает структуру, принципы построения и вопросы стандартизации производствен-
ных измерительных систем (ИС). В первой части пособия представлены совре-
менные подходы к синхронизации проводимых измерений, оценке влияния
программного обеспечения ИС на результаты измерений, проблемам досто-
верной передачи измерительной информации.

Для студентов, обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры,
может быть полезно специалистам, занимающимся созданием, эксплуатацией
и метрологическим обеспечением автоматизированных измерительных систем.

УДК 006.9:681.518.3(075.8)

ББК 30.10-05я73

ISBN 978-5-7996-2448-4

ISBN 978-5-7996-2449-1 (часть 1)

© Уральский федеральный университет, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Глава 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИИ	8
1.1. Измерения	8
1.1.1. Прямые, косвенные, совокупные и совместные измерения	9
1.1.2. Статические и динамические измерения	10
1.1.3. Однократные и многократные измерения	10
1.1.4. Классификация методов измерений	11
1.2. Средства измерительной техники	13
1.2.1. Средства измерений	13
1.2.2. Эталоны	15
1.2.3. Средства сравнения	17
1.2.4. Измерительные принадлежности	18
1.2.5. Измерительные установки	19
1.2.6. Измерительные системы	19
1.3. Единицы величин	20
1.4. Погрешность и неопределенность результатов измерений	26
1.4.1. Традиционный подход	26
1.4.1.1. Абсолютная и относительная погрешности	27
1.4.1.2. Случайная и систематическая погрешности	27
1.4.1.3. Инструментальные, методические и субъективные погрешности	32
1.4.1.4. Основные и дополнительные погрешности	32
1.4.2. Модифицированный подход к оцениванию показателей точности результатов измерений	33
1.4.3. Совместное использование понятий «погрешность» и «неопределенность» измерения	39
1.5. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений	41
1.5.1. Характеристики, предназначенные для определения результатов измерений	42
1.5.2. Метрологические характеристики СИ	43

1.5.3. Характеристики чувствительности СИ	44
1.5.4. Неинформативные параметры выходного сигнала СИ	45
1.5.5. Динамические характеристики СИ	45
1.6. Формы выражения пределов допускаемых погрешностей средств измерений	46
1.6.1. Абсолютная погрешность	47
1.6.2. Приведенная погрешность	47
1.6.3. Относительная погрешность	48
1.6.4. Дополнительные погрешности	48
1.6.5. Классы точности СИ	49
Глава 2. СТРУКТУРНЫЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	51
2.1. Многоканальность измерительных систем	51
2.2. Временная синхронизация процессов измерений	53
2.2.1. О важности синхронизации процессов измерений в ИС	54
2.2.2. Основные методы синхронизации процессов измерений в ИС	56
2.2.3. Принципы функционирования глобальной навигационной спутниковой системы	58
2.3. Агрегатно-модульный принцип построения измерительных систем	60
2.4. ПЭВМ и прикладное программное обеспечение	65
2.4.1. Основные характеристики ПЭВМ	66
2.4.2. Структура программного обеспечения ПЭВМ	67
2.4.3. Методы оценки влияния ПО на метрологические характеристики СИ	68
2.5. Аппаратура и каналы связи измерительных систем	73
Глава 3. СТАНДАРТИЗАЦИЯ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	80
3.1. Основные проблемы передачи измерительной информации в измерительных системах	80
3.2. Сигналы электрические непрерывные входные и выходные	84
3.3. Сигналы электрические с дискретным изменением параметров	90
3.4. Пороговый приемник дискретных сигналов	93

Глава 4. СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПРОТОКОЛОВ ОБМЕНА	104
4.1. Информационные характеристики дискретного сообщения	104
4.2. Базовая эталонная модель взаимосвязи открытых систем	108
4.2.1. Физический уровень базовой эталонной модели ВОС	112
4.2.2. Канальный уровень базовой эталонной модели ВОС	118
4.3. Кодирование информации	119
4.3.1. Двоичное кодирование	119
4.3.2. Циклическое кодирование	121
4.4. Кодовое расстояние и помехозащищенность кода	130
4.5. Нормативные требования к достоверности передаваемых данных	135
<i>Приложение. Пример оценки методической составляющей погрешности измерения электрической энергии, обусловленной цифровым алгоритмом обработки данных статического счетчика электрической энергии, в системе графического программирования LabVIEW</i>	<i>146</i>
Библиографические ссылки	163

ПРЕДИСЛОВИЕ

Потребности граждан и государства в получении достоверных и сопоставимых результатов измерений, используемых в целях защиты жизни и здоровья граждан, охраны окружающей среды, обеспечения обороны и безопасности государства, требуют единства проводимых измерений, при котором результаты измерений выражены в допущенных к применению в Российской Федерации единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы.

Современное развитие измерительной техники в связи с повышенными требованиями к достоверности, быстродействию, автоматизации и полноте контроля характеристик объекта измерений характеризуется широким внедрением автоматизированных измерительных систем. Такие системы позволяют решать задачи, недоступные традиционным средствам измерений, и представляют собой совокупность средств измерительной техники, размещенных в разных точках объекта измерения и функционально объединенных в измерительные каналы, которые обеспечивают измерения в реальном масштабе времени контролируемых характеристик объекта измерений.

Проблемам метрологического обеспечения измерительных систем, включающим установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений, в последнее время уделяется значительное внимание.

В настоящем учебном пособии приводятся базовые понятия метрологии, необходимые для понимания последующего материала, и рассматриваются структура, принципы построения и вопросы стандартизации наиболее распространенных в промышленности измерительных систем (ИС), которые можно назвать «производственными» ИС. Термин «производственные» средства измерений (СИ) предложен в [2] для обозначения рабочих СИ, используемых в про-

мышленности для обеспечения заданных характеристик технологических процессов, контроля качества и количества произведенной продукции и т. п. ИС являются разновидностью СИ. Поэтому и среди ИС можно выделить «производственные» системы, к которым, в частности, относятся ИС, используемые для измерения и контроля параметров технологических процессов, объемов производства и распределения энергоресурсов, технического и коммерческого учета электрической и тепловой энергии в стране.

В первой части пособия рассматриваются основные понятия метрологии, включая современные подходы к совместному использованию понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Анализируются структурные и конструктивные особенности цифровых ИС, современные методы синхронизации проводимых измерений с использованием глобальных навигационных спутниковых систем, методы оценки влияния программного обеспечения ИС на результаты измерений, проблемы достоверной передачи измерительной информации в измерительных каналах производственных ИС.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры по направлению подготовки «Стандартизация и метрология» и может быть полезно специалистам, занимающимся созданием, эксплуатацией и метрологическим обеспечением автоматизированных измерительных систем.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТРОЛОГИИ

Метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Степень развития метрологии определяется потребностями практики. С развитием промышленного производства растут требования к проведению измерений, т. е. развивается метрология. Современные определения основных понятий метрологии зафиксированы в [1] и используются в данной работе.

1.1. Измерения

В соответствии с [1] под измерением понимают процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны измеряемой величине. При этом величина есть свойство материального объекта или явления, общее в качественном отношении для многих объектов или явлений, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

Совокупность измерений величин, свойственных какой-либо области науки или техники и выделяющихся своей спецификой, определяет область измерений. В частности, выделяют ряд областей измерений: механические, электрические, магнитные, тепловые и др. Часть области измерений, имеющая свои особенности и отличающаяся однородностью измеряемых величин, определяет вид измерений. Например, в области электрических и магнитных измерений могут быть выделены как виды измерений: измерения электрического напряжения, магнитной индукции и др.

Измерения различают по:

- способу получения информации;
- количеству измерительной информации;

- характеру изменений измеряемой величины в процессе измерений;
- используемому методу измерения.

1.1.1. Прямые, косвенные, совокупные и совместные измерения

По способу получения информации измерения разделяют на прямые, косвенные, совокупные и совместные.

П р я м о е и з м е р е н и е – это измерение, при котором искомое значение величины получают непосредственно от средства измерений. В качестве прямых измерений можно привести следующие примеры: измерение силы тока амперметром, измерение массы на весах.

К о с в е н н о е и з м е р е н и е – это измерение, при котором искомое значение величины определяют на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной. К косвенным измерениям можно отнести, например, определение плотности ρ тела цилиндрической формы по результатам прямых измерений массы m , высоты h и диаметра цилиндра d , связанных с плотностью уравнением

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 h}.$$

С о в о к у п н ы е и з м е р е н и я – это проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях. В качестве примера совокупных измерений можно рассмотреть [2] один из применяемых методов измерения взаимной индуктивности индуктивно связанных катушек с индуктивностями L_1 и L_2 , оказывающих влияние друг на друга через общий для них магнитный поток. Для получения искомого результата сначала соединяют катушки так, чтобы их магнитные поля складывались, при этом общая индуктивность $L_{01} = L_1 + L_2 + 2M$, где M – взаимная индуктивность между катушками. Затем катушки соединяют так, чтобы их магнитные поля вычитались. В этом случае

общая индуктивность $L_{02} = L_1 + L_2 - 2M$. Значения L_{01} и L_{02} получают с помощью прямых измерений. Решение уравнений для L_{01} и L_{02} позволяет найти искомую однородную величину M с помощью соотношения

$$M = (L_{01} - L_{02})/4.$$

С о в м е с т н ы е и з м е р е н и я – это проводимые одновременно измерения двух или нескольких неодновременных величин для определения зависимости между ними. Например, измерение температурного коэффициента сопротивления резистора $\partial R/\partial t$ по данным прямых измерений его сопротивления $R(t)$ при различных температурах t :

$$\frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\Delta R}{\Delta t} = \frac{R(t_1) - R(t_2)}{t_1 - t_2}.$$

1.1.2. Статические и динамические измерения

По характеру изменений измеряемой величины измерения разделяются на статические и динамические.

С т а т и ч е с к о е и з м е р е н и е – это измерение величины, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей неизменной на протяжении времени измерения.

Д и н а м и ч е с к о е и з м е р е н и е – это измерение, при котором средства измерений используют в динамическом режиме, т. е. при изменении условий (факторов) за время проведения измерительного эксперимента, которые влияют на результат измерения (оценку измеряемой величины).

1.1.3. Однократные и многократные измерения

По количеству получаемой измерительной информации различают однократные и многократные измерения.

О д н о к р а т н ы е и з м е р е н и я – это измерения, при которых число измерений равняется числу измеряемых величин. Если измеряется одна величина, то измерение проводится один раз. Следует иметь в виду, что руководствоваться одним опытом при измерении той или иной величины не всегда оправдано. Весьма велика вероятность грубой ошибки – промаха.

Многokратные измерения – это измерения, при которых число измерений превышает число измеряемых величин. Многokратные измерения проводят с целью уменьшения случайных составляющих погрешностей измерения.

1.1.4. Классификация методов измерений

По используемому методу измерения – совокупности приемов сравнения измеряемой величины с ее единицей в процессе измерений различают [2]:

метод непосредственной оценки – метод измерений, при котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора. Например, измерение напряжения вольтметром;

дифференциальный метод измерений представляет собой метод, при котором измеряемая величина сравнивается с однородной величиной, имеющей известное значение, воспроизводимое мерой. Пример реализации такого метода представлен на рис. 1.1.

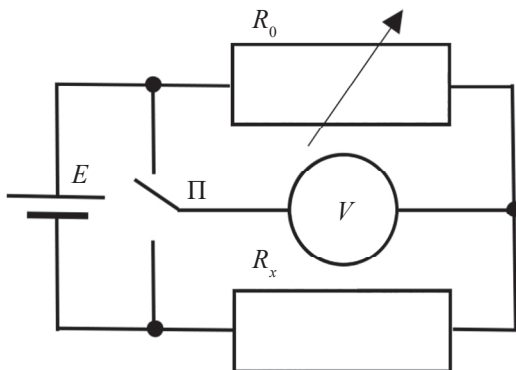


Рис. 1.1. Дифференциальный метод измерения

Вольтметр V включается с помощью переключателя Π в цепь с измеряемым сопротивлением R_x или в цепь с регулируемым потенциометром (мерой) R_0 . При равенстве показаний вольтметра, имеющих место при $R_x = R_0$, регистрируется искомое значение R_x ;

метод сравнения с мерой, при котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Например, измерение массы на рычажных весах с уравновешиванием гирями (мерами массы с известными значениями);

метод измерения дополнением, при котором значение измеряемой величины дополняется мерой этой же величины с таким расчетом, чтобы на прибор сравнения воздействовала их сумма, равная заранее заданному значению;

метод замещения, при котором измеряемую величину замещают мерой с известным значением величины. Например, измерение емкости конденсатора, включенного в колебательный контур. Путем изменения частоты напряжения, подаваемого на колебательный контур от измерительного генератора, можно добиться резонанса. После этого вместо конденсатора с неизвестной емкостью в контур включается конденсатор с регулируемой известной емкостью (мера) и вновь проводится настройка контура в резонанс, при котором неизвестная емкость равна емкости меры;

нулевой метод, при котором результирующий эффект воздействия измеряемой величины и меры на средство сравнения доводят до нуля. Характерным примером нулевого метода является измерение активного сопротивления мостом постоянного тока (рис. 1.2).

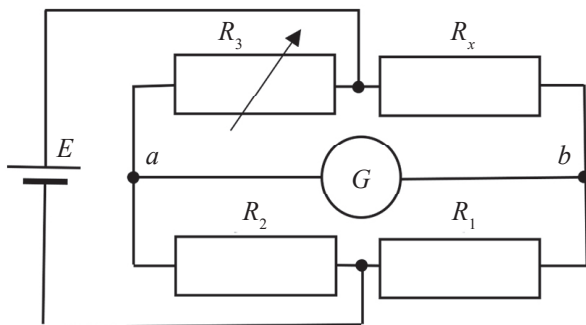


Рис. 1.2. Мостовая схема измерения сопротивления

Мостовая схема оказывается полностью уравновешенной (гальванометр G показывает нуль), когда потенциалы точек «а» и «b», показанных на рисунке, совпадают. Указанное условие будет выполнено, если падение напряжения U_{R1} на резисторе R_1 и падение напряжения U_{R2} на резисторе R_2 равны между собой:

$$U_{R2} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} = \frac{R_1}{R_1 + R_x} = U_{R1}.$$

Из последнего уравнения получаем: $R_2(R_1 + R_x) = R_1(R_2 + R_3)$. Окончательное выражение для значения R_x , обеспечивающего уравновешенность мостовой схемы, имеет вид: $R_x = R_1R_3/R_2$.

1.2. Средства измерительной техники

Средства измерительной техники – обобщающее понятие, охватывающее технические средства, специально предназначенные для измерений. К средствам измерительной техники в соответствии с [1] относят средства измерений, эталоны, средства сравнения, измерительные принадлежности, измерительные установки, измерительные системы и др.

1.2.1. Средства измерений

Средство измерений (СИ) – это техническое средство, предназначенное для проведения измерений и имеющее нормированные (установленные) метрологические характеристики. К средствам измерений относятся меры, измерительные преобразователи, измерительные приборы.

Меры

Мера физической величины – это СИ, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит величины одного или более данных родов с приписанными им значениями. Например, эталонная гиря, эталонный резистор, линейная шкала (линейка), концевая мера длины. Материальная мера может быть эталоном.

Меры, воспроизводящие физическую величину одного размера, называются однозначными. Меры, воспроизводящие физическую

величину разных размеров, называются многозначными. Примером многозначной меры является миллиметровая линейка, воспроизводящая наряду с миллиметровыми также и сантиметровые размеры длины.

Применяются меры также в виде наборов и магазинов мер. Набор мер представляет собой комплект однородных мер разного размера, предназначенных для применения в различных сочетаниях (например, набор концевых мер длины). Магазин мер – набор мер, конструктивно объединенных в единое устройство, в котором предусмотрено соединение мер в необходимых комбинациях (например, магазин электрических сопротивлений).

Измерительные преобразователи

Измерительный преобразователь – это СИ или его часть, служащее для получения и преобразования информации об измеряемой величине в форму, удобную для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи. Например, термopара, трансформатор электрического тока.

Измерительные преобразователи не имеют устройств отображения измерительной информации, они или не входят в состав измерительных приборов (установок), или применяются совместно с ними.

Самым распространенным по количеству видов средств измерения являются первичные измерительные преобразователи, которые служат для непосредственного восприятия измеряемой величины, как правило, неэлектрической, и преобразования ее в другую величину – электрическую. Первичные измерительные преобразователи иногда не изменяют рода физической величины, а служат лишь для изменения размера измеряемой величины (например, измерительные трансформаторы тока и напряжения).

Промежуточными (вторичными) измерительными преобразователями называются преобразователи, расположенные в измерительной цепи после первичного преобразователя и обычно однородные с ним по измеряемой (преобразуемой) физической величине.

По характеру преобразования измерительные преобразователи разделяются на аналоговые, аналого-цифровые (АЦП), цифроана-

логовые (ЦАП). Можно рассматривать и цифровые преобразователи, служащие, например, для изменения формата цифрового сигнала.

Например, преобразование цифровых сигналов тока и напряжения в электрическую мощность постоянного тока. Указанные преобразователи почти всегда являются промежуточными.

Измерительные приборы

Измерительный прибор – это СИ, предназначенное для обработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия. Например, микрометр, термометр, электронные весы.

Особое место занимают приборы прямого действия [3], преобразующие измеряемую величину, как правило, без изменения ее рода и отображающие ее на показывающем устройстве, проградуированном в единицах этой величины (амперметры, вольтметры и др.). Для отображения результатов измерения используется измерительная шкала, представляющая собой часть прибора, содержащую упорядоченный набор меток (деления шкалы) вместе со значениями соответствующей величины.

Множество значений величины, заключенное между начальным и конечным делениями шкалы, определяет диапазон показаний прибора. Если диапазон измерений прибора (диапазон, внутри которого установлены пределы погрешности прибора) не занимает всю длину шкалы, то пределы диапазона измерений должны быть четко обозначены на шкале. Пример такого обозначения приведен на рис. 1.3 для шкалы амперметра с диапазоном измерений от 20 до 100 мА. Как видно из рисунка, пределы диапазона измерений обозначены точками и за этими пределами шкала не содержит младших делений.

1.2.2. Эталоны

Эталон единицы величины – средство измерительной техники, предназначенное для воспроизведения, хранения и передачи единицы величины другим средствам измерений.

Согласно [1] возможны три процедуры воспроизведения единицы величины.



Рис. 1.3. Пример выделения диапазона измерений на шкале прибора

Первая состоит в физической реализации единицы измерения в соответствии с ее определением (воспроизведение в буквальном смысле).

Вторая процедура состоит в использовании высокостабильного эталона, основанного на физическом явлении, как, например, в случае использования стабилизированного по частоте лазера при воспроизведении метра.

Третья процедура состоит в принятии материальной меры в качестве эталона. Это имеет место, например, в случае эталона килограмма.

Процедура хранения единицы представляет собой совокупность операций, обеспечивающих неизменность во времени размера единицы, воспроизводимой, хранимой и передаваемой данным эталоном. Хранение единицы осуществляется при соблюдении обязательных технических требований и требований к содержанию и применению эталона.

Передача единицы величины есть процедура приведения размера величины, хранимой средством измерений, к единице величины, воспроизводимой или хранимой эталоном данной единицы величины.

По приоритету воспроизведения и хранения единицы эталоны подразделяются на первичные, вторичные и рабочие эталоны.

Первичный эталон обеспечивает воспроизведение единицы с наивысшей точностью. Первичный эталон выполняет

задачу воспроизведения единицы величины для ее использования при всех измерениях данной величины. Метрологические свойства первичных эталонов единиц величин устанавливают независимо от других эталонов единиц этих же величин.

Эталон, обеспечивающий воспроизведение, хранение и передачу единицы величины с наивысшей в Российской Федерации точностью, называется **г о с у д а р с т в е н н ы м п е р в и ч н ы м э т а л о н о м** и утверждается в этом качестве в установленном порядке. Государственные первичные эталоны единиц величин подлежат сличению с эталонами единиц величин Международного бюро мер и весов (МБМВ) и национальными эталонами единиц величин других государств. В рамках сличения устанавливают соотношение между результатами измерений при воспроизведении и передаче единицы измерения сличаемыми эталонами одного уровня точности.

В т о р и ч н ы й э т а л о н получает единицу величины непосредственно от первичного эталона данной единицы. К вторичным эталонам относятся также эталоны сравнения, применяемые для сличений эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом.

К р а б о ч и м э т а л о н а м относят эталоны, предназначенные для передачи единицы величины средствам измерений. При необходимости рабочие эталоны подразделяют на разряды (1-й, 2-й, ..., *n*-й). В этом случае передачу единицы осуществляют через цепочку соподчиненных по разрядам рабочих эталонов. При этом от последнего рабочего эталона в этой цепочке единицу передают средству измерений.

1.2.3. Средства сравнения

Средство сравнения – техническое средство или определенная среда, посредством которых возможно выполнять сравнение друг с другом мер однородных величин или показания измерительных приборов.

В качестве средств сравнения при проведении электрических измерений нулевым методом широко применяются мосты постоянного и переменного токов.

Мосты постоянного тока используются для измерения сопротивлений от 10 Ом и выше и представляют собой в простейшем случае четырехплечие мосты с питанием от источника постоянного тока (см. рис. 1.2). Конструктивно мосты оформляются в виде переносных приборов, рассчитанных на работу с собственным или наружным указателем равновесия (обычно это гальванометры).

Мосты переменного тока применяются для измерения параметров компонентов электрических схем: активного сопротивления, индуктивности и добротности катушек индуктивности, емкости и тангенса угла диэлектрических потерь конденсаторов. В простейшем случае мост переменного тока представляет мостовую схему, аналогичную схеме четырехплечего моста, представленной на рис. 1.2, в которой известные активные сопротивления R_1, R_2, R_3 и неизвестное сопротивление R_x заменены комплексными известными сопротивлениями Z_1, Z_2, Z_3 и неизвестным комплексным сопротивлением Z_x . Условие равновесия моста переменного тока имеет вид, аналогичный условию равновесия моста постоянного тока, а неизвестное комплексное сопротивление аналогичным образом выражается через комплексные сопротивления плеч моста:

$$Z_x = Z_1 \cdot Z_3 / Z_2.$$

В качестве другого примера рассматриваемых средств можно привести приборы сравнения типа К507, К535 [4] или более современные приборы типа КНТ-03, КНТ-05, которые используются при поверке дифференциальным методом измерительных трансформаторов тока и напряжения. Принцип действия указанных приборов основан на дифференциальном методе измерения отклонения действительных коэффициентов трансформации поверяемых трансформаторов от номинальных коэффициентов путем сравнения амплитуд и фаз вторичных токов и напряжений эталонного и поверяемого трансформаторов.

1.2.4. Измерительные принадлежности

Измерительные принадлежности представляют собой вспомогательные устройства, служащие для обеспечения необходимых условий при выполнении измерений с требуемой точностью, пред-

назначенные, в частности, для защиты от воздействия влияющих величин.

Например, термостат, барокамера, источники электропитания и т. д.

1.2.5. Измерительные установки

Измерительная установка представляет собой совокупность функционально объединенных и расположенных в одном месте мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств и предназначена для измерений одной или нескольких величин.

Примечание. Измерительную установку, применяемую для поверки, называют поверочной установкой.

1.2.6. Измерительные системы

Измерительная система (ИС) представляет собой совокупность средств измерений и других средств измерительной техники, размещенных в разных точках объекта измерения, функционально объединенных с целью измерений одной или нескольких величин, свойственных этому объекту.

Пример: измерительная система теплоэлектростанции, позволяющая получать измерительную информацию о значениях технологических величин в разных точках энергоблоков теплоэлектростанции. В настоящее время большинство измерительных систем являются автоматизированными, реже автоматическими. Несмотря на различные названия (АИС – автоматизированная измерительная система, ИИС – информационно-измерительная система, ИВК – измерительно-вычислительный комплекс и т. п.), все они по существу обеспечивают автоматизацию процессов измерений, обработки и отображения результатов измерений.

Согласно [5] различают два вида измерительных систем: ИС-1 и ИС-2.

ИС-1 – это ИС широкого применения, выпускаемые изготовителем как законченные укомплектованные изделия, для установки которых на месте эксплуатации достаточно указаний, изложенных в их эксплуатационной документации.

ИС-2 – это ИС целевого применения, проектируемые для конкретных объектов из компонентов ИС, выпускаемых, как правило, различными изготовителями, и принимаемые как законченное изделие непосредственно на объекте эксплуатации. Установку таких ИС на месте эксплуатации осуществляют в соответствии с проектной документацией на ИС и эксплуатационной документацией на ее компоненты, в которой нормированы метрологические характеристики ИК и компонентов ИС.

1.3. Единицы величин

Одним из предназначений метрологии как науки и области практической деятельности является обеспечение единства измерений. В соответствии с Федеральным законом № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» единство измерений – состояние измерений, при котором их результаты выражены в допущенных к применению в РФ единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы.

При этом под единицей (измерения) величины понимается [1] величина фиксированного размера, которой присвоено числовое значение, равное 1, определяемая и принимаемая по соглашению для количественного выражения однородных с ней величин. Узаконенными считаются единицы, установленные для применения в стране в соответствии с законодательными актами. В частности, в стране используется Международная система единиц (международное название SI, в русской транскрипции – СИ). Ниже в соответствии с ГОСТ 8.417 [6] дано описание совокупности основных и производных единиц СИ вместе с их кратными и дольными единицами.

Основные единицы СИ представлены в табл. 1.1. Производные единицы СИ образуют при помощи уравнений связи. Примеры производных единиц приведены в табл. 1.2.

Внесистемные единицы, примеры которых представлены в табл. 1.3, допускаются к применению наравне с единицами СИ.

Наименования и обозначения десятичных кратных и дольных единиц СИ образуют с помощью множителей и приставок, указанных в табл. 1.4.

Т а б л и ц а 1.1

Основные единицы СИ

Величина		Единица величины		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			Международное	Русское
Длина	L	метр ¹⁾	m	м
Масса	M	килограмм ²⁾	kg	кг
Время	T	секунда ³⁾	s	с
Сила электрического тока	I	ампер ⁴⁾	A	A
Термодинамическая температура	Θ	кельвин ⁵⁾	K	K
Количество вещества	N	моль ⁶⁾	mol	моль
Сила света	J	кандела ⁷⁾	cd	кд

¹⁾ Метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени 1/299 792 458 s.

²⁾ Килограмм есть единица массы, равная массе международного прототипа килограмма.

³⁾ Секунда есть время, равное 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133.

⁴⁾ Ампер есть сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 m один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 m силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ N.

⁵⁾ Кельвин есть единица термодинамической температуры, равная 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды.

⁶⁾ Моль есть количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 kg. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или специфицированными группами частиц.

⁷⁾ Кандела есть сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Hz, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1/683 W/sr.

Т а б л и ц а 1.2

Примеры производных единиц СИ

Величина		Единица величины		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			Международное	Русское
Площадь	L^2	квадратный метр	m^2	m^2
Сила	$LM T^{-2}$	ньютон	N	Н
Давление	$L^{-1}MT^{-2}$	паскаль	Pa	Па
Частота	T^{-1}	герц	Hz	Гц
Количество электричества	$T \cdot I$	кулон	C	Ку
Электрическое напряжение	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	V	В
Мощность	L^2MT^{-3}	ватт	W	Вт
Энергия, работа	L^2MT^{-2}	джоуль	J	Дж
Магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	T	Тл
Напряженность магнитного поля	$L^{-1}I$	ампер на метр	A/m	А/м

Т а б л и ц а 1.3

Примеры внесистемных единиц, допускаемых к применению*

Наименование величины	Наименование	Единица величины			Соотношение с единицей СИ	Область применения
		Обозначение		Русское		
		Международное				
Масса	тонна	t		т	$1 \cdot 10^3 \text{ kg}$	Все области
Время	минута	min		мин	60 s	Все области
	час	h		ч	3 600 s	
	сутки	d		сут	86 400 s	
Объем	литр	l		л	$1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	Все области
Площадь	гектар	ha		га	$1 \cdot 10^4 \text{ m}^2$	Сельское и лесное хозяйство
Энергия	киловатт-час	kW · h		кВт · ч	$3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$	Электротехника
Полная мощность	вольт-ампер	V · A		В · А		
Реактивная мощность	вар	var		вар		
Количество электричества	ампер-час	A · h		А · ч	$3,6 \cdot 10^3 \text{ C}$	

Наименование величины	Единица величины				
	Наименование	Обозначение		Соотношение с единицей СИ	Область применения
		Международное	Русское		
Давление	бар миллиметр ртутного столба	bar mm Hg	бар мм рт. ст.	$1 \cdot 10^5$ Pa 133,3224 Pa	Все области Медицина, метеорология
Количество теплоты	калория	cal	кал	4,1868 J	Промышленность
Тепловая мощность	калория в секунду	cal/s	кал/с	4,1868 Вт	
Количество информации	бит байт	bit	бит	–	Информационные технологии
		byte	байт	–	

* См.: Постановление Правительства РФ № 879 от 31.10.2009 г.

Т а б л и ц а 1.4

**Множители и приставки, используемые
для образования кратных и дольных единиц СИ**

Множитель	Приставка	Обозначение	
		Международное	Русское
10^{24}	иота	Y	И
10^{21}	зета	Z	З
10^{18}	экса	E	Э
10^{15}	пета	P	П
10^{12}	тера	T	Т
10^9	гига	G	Г
10^6	мега	M	М
10^3	кило	k	к
10^2	гекто	h	г
10^1	дека	da	да
10^{-1}	деци	d	д
10^{-2}	санти	c	с
10^{-3}	милли	m	м
10^{-6}	микро	μ	мк
10^{-9}	нано	n	н
10^{-12}	пико	p	п
10^{-15}	фемто	f	ф
10^{-18}	атто	a	а
10^{-21}	зепто	z	з
10^{-24}	иокто	y	и

1.4. Погрешность и неопределенность результатов измерений

В соответствии с [1] результат измерения есть множество значений величины, приписываемых измеряемой величине вместе с любой другой доступной и существенной информацией. Информация, приписываемая измеряемой величине, определяется особенностями конкретного измерения и соответствует требованиям, предъявляемым к этому измерению. В большинстве случаев эта информация относится к точности измерения и выражается показателями точности, к которым относятся, например, среднее квадратическое отклонение, доверительные границы погрешности, стандартная неопределенность измерений, суммарная стандартная и расширенная неопределенности и др.

В настоящее время существует два подхода к способам оценивания показателей точности результатов измерений – т р а д и ц и о н н ы й и м о д и ф и ц и р о в а н н ы й.

1.4.1. Традиционный подход

Традиционный подход основан на понятии «погрешность результата измерения» ΔX , под которой понимается [2] отклонение результата измерения \widetilde{X} от истинного значения измеряемой величины $X_{\text{и}}$:

$$\Delta X = \widetilde{X} - X_{\text{и}}. \quad (1.1)$$

При этом под истинным значением измеряемой величины $X_{\text{и}}$ понимается значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину. Истинное значение физической величины может быть получено только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений.

Поскольку истинное значение точно неизвестно, то неизвестна и погрешность результата измерения. На этом основании сторонники модифицированного подхода говорят о неопределенности термина «погрешность измерения» и предлагают заменить его

термином «неопределенность измерения». Ниже мы рассмотрим этот подход более подробно.

На практике для оценки погрешности результата измерения пользуются понятием действительного значения физической величины, под которым понимают значение, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него. При этом оценка погрешности измерения принимает вид (1.1), где истинное значение $X_{\text{и}}$ измеряемой величины заменяется на действительное значение этой величины.

В рамках традиционного подхода погрешности измерений классифицируют по ряду признаков [2]:

- по способу представления погрешности;
- по характеру изменения погрешности при повторных измерениях;
- по причине возникновения;
- по условиям проведения измерений.

1.4.1.1. Абсолютная и относительная погрешности

В зависимости от способа представления различают абсолютные и относительные погрешности:

- **а б с о л ю т н а я** п о г р е ш н о с т ь измерения – это погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины;

- **о т н о с и т е л ь н а я** п о г р е ш н о с т ь измерения – погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному или измеренному значению измеряемой величины. Относительную погрешность в долях или процентах находят из соотношений

$$\delta = \frac{\Delta X}{\widetilde{X}} \quad \text{или} \quad \delta = \frac{\Delta X}{\widetilde{X}} \cdot 100 \%,$$

где \widetilde{X} – действительное или измеренное значение величины.

1.4.1.2. Случайная и систематическая погрешности

По характеру изменения результатов при повторных измерениях различают случайные и систематические погрешности.

Случайная погрешность измерения есть составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях, проведенных в определенных условиях. В процессе любого измерения присутствуют многочисленные влияющие величины, например, температура, давление, влажность окружающей среды, напряжение электропитания и т. п. Учесть влияние этих величин практически невозможно, но их совместное воздействие (случайная комбинация воздействий) приводит к рассеянию результатов и погрешностей измерений одной и той же величины. Мерой такого рассеяния обычно служит среднее квадратическое отклонение (СКО) результатов измерений от их среднего значения. В качестве оценки СКО обычно используют выборочное СКО, определяемое по формуле

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})^2}{N-1}},$$

где S_X – выборочное СКО; X_k – k -й результат измерений в выборке; N – число результатов измерений в выборке; \bar{X} – среднее арифметическое значение результатов измерений в выборке, определяемое по формуле

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k.$$

Доверительные границы ε (без учета знака) случайной погрешности в предположении нормального распределения результатов измерений вычисляют [7] по формуле

$$\varepsilon = t \cdot S_{\bar{X}}, \quad (1.2)$$

где $t \equiv t(P)$ – коэффициент Стьюдента, который в зависимости от доверительной вероятности P и числа результатов измерений N находят из табл. 1.5; $S_{\bar{X}}$ – СКО среднего арифметического, которое определяют по формуле

$$S_{\bar{X}} = \frac{S_X}{\sqrt{N}}. \quad (1.3)$$

К случайным погрешностям измерений относят и т. н. г р у - б ы е п о г р е ш н о с т и (п р о м а х и). Под промахом понимают погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, который для данных условий резко отличается от остальных результатов этого ряда. Источником промаха может быть, например, неправильный отсчет показаний прибора. В случае измерительных систем с цифровыми каналами передачи измерительной информации источником промаха могут быть т. н. необнаруженные ошибки [8], возникающие вследствие воздействия на процесс передачи информации электромагнитных помех, действующих в канале.

Т а б л и ц а 1.5

Значения коэффициентов Стьюдента $t(P)$

$N - 1$	$P = 0,95$	$P = 0,99$	$N - 1$	$P = 0,95$	$P = 0,99$
3	3,182	5,841	20	2,086	2,845
5	2,571	4,032	24	2,064	2,797
8	2,306	3,355	30	2,042	2,750
10	2,228	3,169	∞	1,960	2,576

Систематическая погрешность измерения – это [2] составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины.

В отсутствие случайных погрешностей систематическую погрешность наиболее просто можно оценить путем сопоставления результатов измерения одной и той же физической величины X , полученных с помощью исследуемого СИ и более точного СИ – эталона (см. рис. 1.4). В этом случае систематическую погрешность результата измерений Δ_c можно оценить по формуле

$$\Delta_c = \widetilde{X}_{\text{СИ}} - \widetilde{X}_{\text{Э}},$$

где $\widetilde{X}_{\text{СИ}}$ и $\widetilde{X}_{\text{Э}}$ – результат измерения величины X с помощью исследуемого СИ и эталона соответственно.

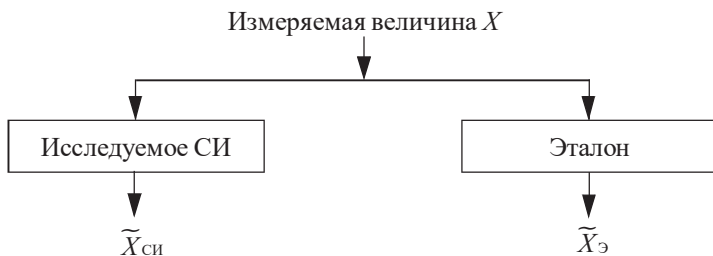


Рис. 1.4. Способ оценки систематической погрешности

Поскольку эталон также имеет систематическую погрешность, то из результата измерения, полученного с помощью исследуемого СИ, можно исключить только часть систематической погрешности. Остаточная после введения поправок систематическую погрешность измерения или систематическую погрешность, поправка на действие которой не вводится вследствие ее малости, называют неисключенной систематической погрешностью (НСП).

Границу НСП оценки измеряемой величины Θ_Σ при пренебрежимо малых случайных составляющих погрешности и наличии менее трех ($m < 3$) составляющих НСП, каждая из которых представлена границами $\pm\Theta_i$ диапазона возможных значений, согласно [7] оценивают по формуле

$$\Theta_\Sigma = \pm \sum_{i=1}^m |\Theta_i|. \quad (1.4)$$

При наличии трех и более составляющих ($m \geq 3$) распределение возможных значений НСП внутри границ $\pm\Theta_i$ этих составляющих рассматривают как распределение случайных величин. При отсутствии данных о виде распределения случайных величин их распределения принимают равномерными, а доверительные границы $\Theta_\Sigma(P)$ оценки измеряемой величины при пренебрежимо малых случайных составляющих погрешности оценивают по формуле

$$\Theta_\Sigma(P) = \pm k \sqrt{\sum_{i=1}^m \Theta_i^2}, \quad (1.5)$$

где k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью P , числом составляющих НСП и их соотношением между собой.

Для доверительной вероятности $P = 0,95$ коэффициент k пренебрежимо мало зависит от числа составляющих НСП и их соотношения, поэтому при указанной доверительной вероятности коэффициент k принимают равным 1,1.

В случае, когда отличны от нуля и случайные и систематические составляющие погрешности измерений, доверительные границы оценки измеряемой величины находят [7] путем построения композиции (закона распределения) суммы случайных погрешностей и НСП, рассматриваемых как случайные величины.

Если доверительные границы случайных погрешностей определяются формулой (1.2), то границы погрешности оценки измеряемой величины Δ (без учета знака) вычисляют [7] по формуле

$$\Delta = K \cdot S_{\Sigma}, \quad (1.6)$$

где K – коэффициент, зависящий от соотношения случайной составляющей погрешности и НСП.

Суммарное СКО S_{Σ} оценки измеряемой величины в (1.2) находят по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\Theta}^2 + S_{\bar{X}}^2},$$

где S_{Θ} – СКО НСП, которое оценивают в зависимости от способа вычисления значений границ НСП Θ_{Σ} в (1.4) или $\Theta_{\Sigma}(P)$ в (1.5) по одной из следующих формул:

$$S_{\Theta} = \frac{\Theta_{\Sigma}}{\sqrt{3}} \quad \text{или} \quad S_{\Theta} = \frac{\Theta_{\Sigma}(P)}{k\sqrt{3}}.$$

Соответственно коэффициент K в (1.6) вычисляют по эмпирическим формулам

$$K = \frac{\varepsilon + \Theta_{\Sigma}}{S_{\bar{X}} + S_{\Theta}} \quad \text{или} \quad K = \frac{\varepsilon + \Theta_{\Sigma}(P)}{S_{\bar{X}} + S_{\Theta}}.$$

1.4.1.3. Инструментальные, методические и субъективные погрешности

По причине возникновения погрешности в соответствии с [2] разделяются на инструментальные, методические и субъективные.

И н с т р у м е н т а л ь н а я (п р и б о р н а я) п о г р е ш н о с т ь – это погрешность СИ, определяемая несовершенством конструкции СИ и влиянием внешних условий. Инструментальная погрешность является одной из наиболее ощутимых составляющих погрешности, причем некоторые из инструментальных погрешностей являются систематическими, другие – случайными (например, за счет нестабильности параметров комплектующих изделий СИ).

М е т о д и ч е с к а я п о г р е ш н о с т ь – составляющая погрешности, обусловленная недостатками метода измерений. Например, при измерении параметров электрических цепей мостовыми методами возникает методическая погрешность из-за неучета соответствующих параметров схемы измерений, например, неучета сопротивления, емкости и индуктивности соединительных проводов.

С у б ь е к т и в н а я п о г р е ш н о с т ь – в узком смысле это погрешность считывания, которая возникает вследствие индивидуальных особенностей оператора, производящего измерения. При использовании автоматических или автоматизированных СИ субъективные погрешности практически отсутствуют.

1.4.1.4. Основные и дополнительные погрешности

По условиям проведения измерений погрешности СИ разделяют на основные и дополнительные.

О с н о в н а я п о г р е ш н о с т ь – это погрешность СИ, применяемого в нормальных условиях. В соответствии с [1] к нормальным условиям измерений относятся условия, предписанные для оценивания характеристик СИ или для сравнения результатов измерений. В нормальных условиях измерений инструментальная погрешность, т. е. составляющая погрешности измерения, обусловленная погрешностью применяемого СИ, будет наименьшей.

Для СИ электрических и магнитных величин нормальные условия применения представлены в главе 2 (табл. 2.1).

Дополнительная погрешность – это составляющая погрешности СИ, возникающая дополнительно к основной погрешности вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений [1].

1.4.2. Модифицированный подход к оцениванию показателей точности результатов измерений

Основные положения модифицированного подхода к оцениванию показателей точности результатов измерений представлены в ГОСТ Р 54500.3 [10], который идентичен международному документу ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression on uncertainty in measurement (GUM:1995)». Этот подход основан на констатации ограниченной применимости терминов «истинное значение величины» и «погрешность результата измерения» и устанавливает общие правила оценивания и выражения неопределенности измерений, которые следует соблюдать при измерениях разной точности – от технических измерений на производстве до фундаментальных научных исследований.

Истинным значением измеряемой величины в соответствии с [1] считается значение, соответствующее определению измеряемой величины. Иначе говоря, определение измеряемой величины включает принятие некоторой модели объекта измерения, в которой истинное значение представлено неким параметром. Всегда существует пороговое несоответствие модели и объекта измерения, которое является причиной т. н. дефинициальной неопределенности измеряемой величины. Дефинициальная неопределенность является результатом ограниченной детализации в определении измеряемой величины и представляет собой практический минимум неопределенности измерений при любом измерении данной величины. Любое изменение детализации в определении величины ведет к другой дефинициальной неопределенности. Только когда дефинициальная неопределенность, связанная с измеряемой величиной, считается пренебрежимо малой по сравнению с остальными составляющими неопределенности измерений, измеряемая

величина может рассматриваться как имеющая «по сути единственное» истинное значение и можно говорить о погрешности результата измерений, понимаемой как отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

В качестве примера модели объекта с дефиниционной неопределенностью можно привести модель прямого кругового цилиндра, используемую при измерении диаметра вала. Только при достаточно малых отклонениях формы вала от принятой модели «единственной» измеряемой величиной будет диаметр окружности вала в любом его поперечном сечении.

В соответствии с [1] неопределенность измерений определяют как неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании измерительной информации.

Неопределенность измерения включает в себя, как правило, много составляющих, к которым относятся: неполное описание измеряемой величины, нерепрезентативная выборка, когда измеряемый образец может не представлять определяемую измеряемую величину, неточные значения, приписанные эталонам, используемым для измерения, разброс значений повторных наблюдений измеряемой величины при явно одинаковых условиях и т. п. Ниже в соответствии с [10] схематически определены основные этапы процедуры оценивания и представления составляющих неопределенности измерения одной измеряемой величины Y .

Этап 1. Математически формулируют связь между измеряемой величиной (выходной величиной) Y и входными величинами X_i , от которых она зависит, в виде функциональной зависимости

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N). \quad (1.7)$$

Функция f должна содержать все величины, которые могут существенно повлиять на неопределенность результата измерения. В большинстве случаев функция f состоит из одного аналитического выражения, но она также может быть составлена из группы таких выражений. Кроме того, функция f может также оцениваться экспериментально, или задаваться как алгоритм в компьютерной программе, или быть комбинацией всех этих форм.

Этап 2. Входные величины X_i , которые для простоты считаем независимыми, делят на две следующие группы:

а) величины, оценки которых могут определяться непосредственно в текущем измерении. Эти значения могут быть получены, например, из одного наблюдения или повторных наблюдений или основаны на соответствующем экспериментальном опыте;

б) величины, оценки которых вносятся внешними источниками, как, например, характеристики используемого эталона или из справочной литературы.

Этап 3. Получают оценку измеряемой величины Y , обозначаемую y , путем замены входных величин X_i в уравнении (1.7) их оценками x_i :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N).$$

При этом предполагается, что входные значения являются лучшими оценками входных величин, в том смысле, что они были откорректированы (были внесены поправки) на влияния и эффекты, значимые для данной модели. Если это не так, то необходимые поправки должны вводиться в модель (1.7) в качестве отдельных входных величин.

Этап 4. Для каждой из входных величин X_i оценивают меру рассеяния этой величины и вклад полученного значения в неопределенность измерения величины Y , связанную с этой входной величиной.

Мерой рассеяния случайных переменных X_i , входящих в модель измерения (1.7), служит дисперсия или положительный квадратный корень из нее, называемый стандартным отклонением. Стандартная неопределенность $u(y)$, связанная с оценкой измеряемой величины y , выражается в виде стандартного отклонения измеряемой величины Y [1]. Она получается из оценок x_i входных величин X_i и связанных с ними стандартных неопределенностей $u(x_i)$.

Оценивание неопределенности измерения, связанной с оценками входных величин, проводят методом оценивания типа А или типа Б.

Метод оценивания типа А

Этот метод применяется, когда для рассматриваемой входной величины при одинаковых условиях измерения проведены N статистически независимых наблюдений. Если повторно измеренная входная величина X_i есть величина Q , то оценка \bar{q} измеряемой величины Q есть среднее арифметическое значение наблюдаемых значений q_j [10]:

$$\bar{q} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N q_j.$$

Наилучшей оценкой дисперсии среднего арифметического значения \bar{q} является выборочная дисперсия среднего значения, которая определяется как

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{N}, \quad (1.8)$$

где $s^2(q)$ – выборочная дисперсия измеренных значений q_j , определяемая выражением

$$s^2(q) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (q_j - \bar{q})^2.$$

Положительный квадратный корень из дисперсии среднего значения, представленной в (1.8), называют [1] выборочным стандартным отклонением среднего арифметического значения. Стандартная неопределенность измерения $u(\bar{q})$, связанная с оценкой \bar{q} , является выборочным стандартным отклонением среднего арифметического значения $u(\bar{q}) = s(\bar{q})$.

Таким образом, стандартную неопределенность $u(x_i)$ оценки x_i , полученную по n статистически независимым наблюдениям входной величины X_i , определяют как

$$u(x_i) = s(\bar{X}), \quad (1.9)$$

где $s(\bar{X})$ – выборочная дисперсия среднего арифметического значения входной величины X_i .

Метод оценивания типа Б

Оценивание стандартной неопределенности измерения по типу Б отличается от статистического анализа ряда наблюдений. Стандартная неопределенность измерения $u(x_i)$, связанная с оценкой x_i входной величины X_i , получается с помощью метрологически обоснованной оценки изменчивости входной величины X_i , учитывающей, в частности:

- данные предшествующих измерений;
- характеристики, заявляемые производителем;
- значения, содержащиеся в свидетельствах о калибровках или других удостоверениях;
- неопределенности величин, которые вместе со значениями этих величин приведены в справочной литературе.

Правильное использование доступной информации для оценивания стандартной неопределенности типа В требует интуиции, основанной на опыте и общих знаниях. Некоторые примеры такого оценивания, пригодные для практического использования, приведены в [10]. Например, в ряде случаев можно оценить только границы (верхний и нижний пределы) для значения величины X_i . Иными словами, можно утверждать, что для практических целей вероятность нахождения значения X_i в интервале от a_- до a_+ близка к единице, а вне пределов этого интервала – несущественна. Если дополнительная вероятность о возможных значениях X_i внутри указанного интервала отсутствует, то остается предположить, что вероятность для X_i принять любое значение в пределах интервала одинакова (что соответствует равномерному распределению вероятностей). Тогда x_i , равное математическому ожиданию X_i , будет средней точкой интервала

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2},$$

а дисперсию $u^2(x_i)$ такого распределения определяют по формуле

$$u^2(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12}.$$

Этап 5. Оценивают суммарную стандартную неопределенность $u_c(y)$ оценки y измеряемой величины Y , которая представляет собой положительный квадратный корень из суммарной дисперсии, определяемой формулой [10]:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i), \quad (1.10)$$

где f – функция, определенная в (1.7); $u(x_i)$ – стандартная неопределенность входной величины X_i ($i = 1, 2, \dots, N$), оцененная по типу А или Б;

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \bigg|_{X_1 = x_1, \dots, X_N = x_N}.$$

Во многих случаях для упрощения вычислений произведение $\partial f / \partial x_i \cdot u(x_i)$ в (1.10) вычисляют численно по формуле [10]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i) &= \\ &= \frac{1}{2} \{ f[x_1, \dots, x_i + u(x_i), \dots, x_N] - f[x_1, \dots, x_i - u(x_i), \dots, x_N] \}. \end{aligned}$$

Суммарная стандартная неопределенность $u_c(y)$ представляет собой оценку стандартного отклонения измеряемой величины Y и характеризует разброс значений, которые с достаточным основанием могут быть приписаны этой величине.

Этап 6. Оценивают расширенную неопределенность результата измерения U , определяющую интервал, в пределах которого находится большая часть распределения значений, которые обоснованно могут быть приписаны измеряемой величине. Расширенную неопределенность U получают умножением суммарной стандартной неопределенности $u_c(y)$ на коэффициент охвата k :

$$U = k \cdot u_c(y).$$

При этом результат измерения удобно выражать в виде $Y = y \pm U$, означаящем, что лучшей оценкой значения, приписываемого измеряемой величине Y , является y и что интервал от $(y - U)$ до $(y + U)$

содержит, как можно ожидать, большую часть распределения значений, которые можно с достаточным основанием приписать Y . Интервал значений $(y - U) \leq Y \leq (y + U)$, который с заданной вероятностью содержит совокупность истинных значений измеряемой величины, называют интервалом охвата [1], а соответствующую вероятность P – вероятностью охвата.

Коэффициент охвата k зависит от вида распределения вероятностей выходной величины и выбранной вероятности охвата P . При нормальном распределении выходной величины и $k = 2$ вероятность охвата приблизительно равна $P \approx 95 \%$, а при $k = 3$ вероятность $P \approx 99 \%$.

1.4.3. Совместное использование понятий «погрешность» и «неопределенность» измерения

Различие между традиционным подходом, использующим понятие «погрешность измерений», и рассмотренным выше модифицированным подходом, основанным на понятии «неопределенность измерений», фактически связано [11] с различием систем координат, относительно которых рассматривают значение измеряемой величины и результат измерений. При рассмотрении погрешности измерений (традиционный подход) начало системы координат совмещают со значением измеряемой величины, наблюдая рассеяние результата измерений; при рассмотрении неопределенности измерений (модифицированный подход) – с результатом измерений, что и создает эффект рассеяния единственного значения измеряемой величины. Поскольку конкретному результату измерений соответствует совокупность возможных значений измеряемой величины, каждое из которых удовлетворяет условию: сумма возможного значения измеряемой величины и соответствующей ему реализации погрешности измерений должна быть равна результату измерений, закон распределения вероятностей возможных значений измеряемой величины определяется законом распределения вероятностей погрешности измерений.

Если характеристики погрешности измерений – это параметр централизованной случайной величины, представляющей собой разность между результатом измерений и значением измеряемой

величины, то неопределенность измерений может быть определена как параметр центрированной случайной величины, представляющей собой разность между возможным значением измеряемой величины и результатом измерений, т. е. величины, совпадающей по модулю с погрешностью измерений, но противоположной ей по знаку. Закон распределения вероятностей этой случайной величины представляет собой зеркальное отражение закона распределения вероятностей погрешности измерений. Поскольку характеристики разброса возможных значений погрешности и неопределенности (выборочное СКО среднего значения – формула (1.3) и стандартная неопределенность оценки измеряемой величины – формула (1.9)) нечувствительны к знаку случайной величины, количественно эти характеристики совпадают между собой.

Вместе с тем проведенный в [12] анализ конкретных метрологических ситуаций выявил сферы применения, в которых рекомендовано предпочтительное использование одного из представленных ниже подходов, а именно:

1) конкретные результаты измерений в любых метрологических ситуациях однозначно могут и должны быть охарактеризованы неопределенностью. Понятие оценки погрешности допускается использовать при калибровке средства измерений;

2) результаты измерений с помощью эталона, выполняемых при сличениях национальных эталонов, представляют с подробными сведениями об оценке неопределенности. Указанные в паспортах на национальные эталоны нормы границ составляющих погрешностей эталонов при этом используют для оценки неопределенности результатов измерений;

3) в аттестованных методиках измерений (МВИ) устанавливаются совокупность операций и правил, выполнение которых обеспечивает получение результата измерения с погрешностью, не превышающей допустимых пределов (норм погрешности измерений). В таких МВИ рекомендуется использовать понятие «погрешность» в виде нормативных пределов погрешностей. Результаты измерения по этим МВИ не требуется сопровождать конкретной характеристикой точности;

4) нормирование метрологических характеристик СИ осуществляют, оперируя понятием «погрешность» и руководствуясь ГОСТ 8.401 [13] и ГОСТ 8.009 [14]. При этом характеристики погрешности используют как пределы допускаемых погрешностей средств измерений данного типа;

5) при поверке оперируют установленными для СИ нормами пределов характеристик их погрешностей. Поэтому в методиках поверки допускается указывать, в каком соотношении должны находиться расширенная неопределенность измерений при поверке и нормы допустимых пределов погрешностей СИ данного утвержденного типа, а также критерии годности поверяемых СИ с учетом неопределенности измерений при поверке.

На основе проведенного анализа в [12] делается общий вывод: результаты измерений в большинстве метрологических ситуаций характеризуются неопределенностью, а нормативы точности СИ, измерительных и контрольных процедур характеризуются погрешностью. Таким образом, понятия «неопределенность» и «погрешность» рекомендуется гармонично использовать без взаимного противопоставления и исключения одного из них.

С учетом указанной рекомендации в дальнейшем в настоящей работе требования к нормативам точности СИ и измерительных систем будут формулироваться в рамках традиционного подхода.

1.5. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений

Метрологическая характеристика (МХ) – это характеристика одного из свойств СИ, влияющая на результат измерений. Номенклатура и способы нормирования МХ для СИ различных типов представлены в [14]. При этом к одному и тому же типу относят СИ одного и того же назначения, основанные на одном и том же принципе действия, имеющие одинаковую конструкцию и изготовленные по одной и той же документации [1].

В соответствии с [14] метрологические характеристики СИ предназначены для:

- определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерений;
- расчета МХ каналов измерительных систем с учетом МХ компонентов этих каналов;
- оптимального выбора СИ;
- использования в качестве контролируемых характеристик при контроле СИ на соответствие установленным нормам.

Метрологические характеристики СИ нормируют для рабочих условий применения, если наибольшее изменение МХ, вызванное изменениями внешних влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала в пределах рабочих условий применения СИ, не превышает 50 % от нормированного значения МХ в нормальных условиях применения. В этих случаях дополнительные погрешности СИ не нормируют.

Метрологические характеристики СИ нормируют для нормальных условий применения, когда наибольшее изменение МХ, вызванное изменениями внешних влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала в пределах рабочих условий применения СИ, превышает 50 % от нормированного значения МХ в нормальных условиях применения. В этих случаях дополнительно к основной погрешности приходится нормировать и дополнительные погрешности СИ.

В соответствии с назначением МХ обычно делят [14] на представленные ниже группы.

1.5.1. Характеристики, предназначенные для определения результатов измерений

К характеристикам СИ, предназначенным для определения результатов измерений, относят следующие:

Ф у н к ц и я п р е о б р а з о в а н и я $Y = f(X)$, где X и Y – значения входной и выходной величины СИ соответственно. Функцию преобразования, общую для типа СИ, называют номинальной

функцией преобразования. Для наиболее распространенных аналоговых показывающих приборов характерно наличие шкал. Шкалу можно рассматривать как фиксированную функциональную зависимость между значением измеряемой величины и перемещением стрелки прибора, т. е. как номинальную функцию преобразования.

Номинальное значение однозначной или многозначной меры – округленное или приближенное значение величины, приписанное СИ, которым следует руководствоваться при его применении. Номинальное значение меры должно выражаться числом 10^n , где n – целое положительное или отрицательное число. Например, номинальное значение однозначной меры сопротивления типа Р310 равно 0,01 или 0,001 Ом.

Цена деления шкалы – разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы СИ. Цена деления прибора или многозначной меры, вообще говоря, изменяется при изменении диапазона измерений.

Вид выходного кода (двоичный, двоично-десятичный), **число разрядов кода**, **цена единицы наименьшего разряда кода СИ**, предназначенных для выдачи результатов в цифровом коде.

1.5.2. Метрологические характеристики СИ

Метрологические характеристики, предназначенные для оценки погрешности СИ, выбирают из числа следующих:

- Характеристика систематической составляющей погрешности СИ Δ_s .

Указанная характеристика может нормироваться в виде:

- пределов (положительного и отрицательного) Δ_{sp} допускаемой систематической погрешности Δ_s ;

- систематической составляющей погрешности СИ Δ_s , математического ожидания $M[\Delta_s]$ и среднего квадратического отклонения $\sigma(\Delta_s)$ систематической составляющей погрешности Δ_s . При этом значение Δ_s рассматривается как случайная величина на множестве СИ данного типа.

- Характеристика случайной составляющей погрешности СИ Δ° .

Указанная характеристика может нормироваться в виде:

- среднего квадратического отклонения $\sigma(\Delta^\circ)$ случайной составляющей погрешности. Указанная характеристика нормируется в виде предела $\sigma_p(\Delta^\circ)$ допускаемого среднего квадратического отклонения случайной погрешности;

- среднего квадратического отклонения $\sigma(\Delta^\circ)$ случайной составляющей погрешности, нормализованной автокорреляционной функции $r_\Delta^\circ(\tau)$ или функции спектральной плотности $S_\Delta^\circ(\omega)$ случайной составляющей погрешности.

- Характеристика случайной составляющей погрешности от гистерезиса Δ_H° .

Характеристика случайной составляющей погрешности от гистерезиса Δ_H° – вариация H показаний измерительного прибора (разность показаний измерительного прибора в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины). Указанная характеристика нормируется путем установления предела (без учета знака) H_p допускаемой вариации выходного сигнала для СИ данного типа.

- Характеристика погрешности СИ.

Характеристика погрешности СИ – значение погрешности, которое рассматривается как случайная величина на множестве СИ данного типа. Характеристику данного типа можно нормировать для СИ, случайная составляющая которых в каждой точке измерений пренебрежимо мала. При нормировании погрешности СИ устанавливают пределы (положительный и отрицательный) Δ_p допускаемой погрешности и предел H_p допускаемой вариации выходного сигнала (показания) СИ данного типа в интервале значений влияющей величины.

- Для СИ конкретных видов допускается нормировать функции или плотности распределения вероятностей систематической и случайной составляющих погрешности.

1.5.3. Характеристики чувствительности СИ

Метрологические характеристики, предназначенные для оценки чувствительности погрешности СИ к влияющим величинам, выбирают из числа следующих:

- функция влияния $\psi(\xi)$, где ξ – данная влияющая величина. Функции влияния нормируют для каждой влияющей величины отдельно путем установления номинальной функции влияния $\psi(\xi)$ и пределов допускаемых отклонений от нее или граничных (верхнего и нижнего) значений функции влияния;

- изменение $\varepsilon(\xi)$ значений метрологических характеристик СИ, вызванное изменением влияющих величин ξ в установленных пределах;

- характеристики, отражающие влияние средства измерений на погрешность измерения, обусловленное взаимодействием СИ с любым из подключенных к его входу или выходу компонентов (таких как объект измерений, СИ и т. п.). Примерами таких характеристик являются входной и выходной импедансы измерительного преобразователя. Нормирование указанных характеристик осуществляются путем установления номинальных характеристик и пределов допускаемых отклонений от них или граничных характеристик.

1.5.4. Неинформативные параметры выходного сигнала СИ

Неинформативные параметры выходного сигнала СИ (параметры, не используемые для передачи или индикации значения информативного параметра входного сигнала) нормируют путем установления номинальных параметров и пределов допускаемых отклонений от них. Строго говоря [15], неинформативные параметры выходного сигнала не являются МХ – они определяют возможность нормальной работы СИ и других устройств, подключаемых к выходу данного СИ. Например, при измерении частоты выходного сигнала некоторого СИ неинформативным параметром измеряемого сигнала является диапазон значений его амплитуды, обеспечивающий нормальную работу используемого для измерения частоты частотомера.

1.5.5. Динамические характеристики СИ

Динамическая характеристика – это характеристика свойств СИ, проявляющаяся в том, что на выходной сигнал этого СИ влияют значения входного сигнала и любые изменения этих значений во времени. Согласно [14] номенклатура дина-

мических характеристик СИ включает в себя полные динамические характеристики, которые полностью описывают математическую модель динамических свойств СИ, и частные динамические характеристики, представляющие собой функционалы или параметры полной динамической характеристики. В число полных динамических характеристик входят, в частности, амплитудно-частотная характеристика, передаточная функция СИ и т. п., а в число частных характеристик – время реакции, максимальная частота измерений (частота дискретизации) и т. п. В случае быстродействующих СИ, для которых время реакции не превышает трех периодов дискретизации, полная динамическая характеристика СИ не нормируется.

1.6. Формы выражения пределов допускаемых погрешностей средств измерений

В соответствии с [1] погрешностью СИ называют разность между показанием СИ и известным опорным (действительным) значением величины. Приведенное определение объединяет вместе определения погрешности в рамках рассмотренных выше традиционного и модифицированного подходов (см. п. 1.4).

При этом действительным называют значение величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него. Соответственно в рамках модифицированного подхода вместо понятия «действительное» значение используют понятие «опорное» значение, которое применяют в качестве основы для сопоставления со значениями величин того же рода. Опорное значение величины может быть истинным значением величины, подлежащей измерению, в этом случае оно неизвестно, или принятым значением величины, в этом случае оно известно.

Принятое значение величины представляет собой значение величины, по соглашению приписанное величине для данной цели. Иногда принятое значение величины является оценкой истинного значения величины. Часто неопределенность измерений, связанная с принятым значением величины, достаточно мала и может быть

принята равной нулю для конкретной цели. В этом случае используют понятие «действительное» значение величины.

Пределом допускаемой погрешности СИ считают [1] наибольшее значение погрешности СИ (без учета знака), устанавливаемое нормативным документом для данного типа СИ, при котором оно еще признается метрологически исправным.

Способы нормирования и формы выражения пределов допускаемых погрешностей СИ определены в ГОСТ 8.401 [13]. Согласно указанному документу пределы допускаемых основных и дополнительных погрешностей СИ принято выражать в форме абсолютных, относительных и приведенных погрешностей.

1.6.1. Абсолютная погрешность

Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности устанавливают по формуле

$$\Delta_p = \pm a \quad (1.11)$$

или в виде линейной зависимости

$$\Delta_p = \pm(a + bX), \quad (1.12)$$

где Δ_p – пределы допускаемой абсолютной основной погрешности, выраженной в единицах измеряемой величины на входе (выходе) или условно в делениях шкалы; X – значение измеряемой величины на входе (выходе) средств измерений или число делений, отсчитанных по шкале; a , b – положительные числа, не зависящие от X .

В обоснованных случаях пределы допускаемой абсолютной погрешности устанавливают по более сложной формуле или в виде графика либо таблицы.

1.6.2. Приведенная погрешность

Пределы допускаемой приведенной основной погрешности устанавливают по формуле

$$\gamma_p = \frac{\Delta_p}{X_N} = \pm p, \quad (1.13)$$

где γ_p – пределы допускаемой приведенной основной погрешности, %; Δ_p – пределы допускаемой абсолютной основной погрешности.

ти, устанавливаемые по (1.11); X_N – нормирующее значение, выраженное в тех же единицах, что и Δ_p ; p – отвлеченное положительное число, выбираемое из ряда:

$$(1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 4,0; 5,0; 6,0) \cdot 10^n,$$

где $n = 1, 0, -1, -2$ и т. д.

Нормирующее значение X_N выбирается [13] с учетом вида и характера шкалы измерительного прибора.

1.6.3. Относительная погрешность

Пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливают по формуле

$$\delta_p = \frac{\Delta_p}{X} = \pm q, \quad (1.14)$$

если значение Δ_p установлено по формуле (1.11), или, если значение Δ_p установлено по формуле (1.12), – по формуле

$$\delta_p = \frac{\Delta_p}{X} = \pm \left[c + d \left(\left| \frac{X_k}{X} - 1 \right| \right) \right], \quad (1.15)$$

где δ_p – пределы допускаемой относительной основной погрешности, %; $c = b + d$, $d = \frac{a}{|X_k|}$; X_k – больший (по модулю) из пределов

измерений; q , c и d – отвлеченные положительные числа, выбираемые из того же ряда, что и значение p в формуле (1.13).

В обоснованных случаях пределы допускаемой относительной основной погрешности устанавливают по более сложной формуле или в виде графика либо таблицы.

1.6.4. Дополнительные погрешности

Пределы допускаемых дополнительных погрешностей устанавливают [13]:

- в виде постоянного значения для всей рабочей области влияющей величины или в виде постоянных значений по интервалам рабочей области влияющей величины;

- путем указания отношения предела допускаемой дополнительной погрешности, соответствующего регламентированному интервалу влияющей величины, к этому интервалу;

- путем указания зависимости предела допускаемой дополнительной погрешности от влияющей величины (предельной функции влияния);

- путем указания функциональной зависимости пределов допускаемых отклонений от номинальной функции влияния.

Пределы допускаемой дополнительной погрешности, как правило, устанавливают в виде дольного (кратного) значения предела допускаемой основной погрешности.

1.6.5. Классы точности СИ

Обобщенной характеристикой данного типа СИ, отражающей уровень его точности, является класс точности [13]. Условное обозначение класса точности указывают в документации СИ и на циферблате, щитке или корпусе СИ. Примеры обозначения классов точности, рекомендованные в [13], с указанием формулы, определяющей значение соответствующей погрешности, представлены в табл. 1.6.

Т а б л и ц а 1.6

Обозначения классов точности СИ

Пределы допускаемой основной погрешности		Обозначение класса точности	
Формула	Пример	В документации	На СИ
<i>Абсолютная погрешность</i>			
Формула (1.11) или (1.12)	—	М	М
<i>Приведенная погрешность</i>			
Формула (1.13)	$\gamma_p = \pm 1,5^*$	Класс точности 1,5	1,5
	$\gamma_p = \pm 0,5^{**}$	Класс точности 0,5	0,5 √

О к о н ч а н и е т а б л . 1.6

Пределы допускаемой основной погрешности		Обозначение класса точности	
Формула	Пример	В документации	На СИ
<i>Относительная погрешность</i>			
Формула (1.14)	$\delta_p = \pm 0,5$	Класс точности 0,5	–
Формула (1.15)	$\delta_p = \left[0,02 + 0,01 \left(\left \frac{x_k}{x} \right - 1 \right) \right]$	Класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01

* Для СИ с равномерной, практически равномерной или степенной шкалой при нормирующем значении X_N , которое определено в соответствии с [13].

** Для СИ с существенно неравномерной шкалой при нормирующем значении X_N , которое определено в соответствии с [13].

За исключением технически обоснованных случаев вместе с условным обозначением класса точности на циферблат, щиток или корпус СИ должно быть нанесено обозначение стандарта или технических условий, устанавливающих технические требования к данному типу СИ.

Глава 2

СТРУКТУРНЫЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Можно выделить ряд структурных и вытекающих из них конструктивных особенностей измерительных систем (ИС). К числу наиболее важных из них относятся:

- многоканальность измерительных систем;
 - временная синхронизация процессов измерений;
 - агрегатно-модульный принцип построения измерительных систем;
 - ПЭВМ и прикладное программное обеспечение;
 - аппаратура и каналы связи измерительных систем.
- Рассмотрим эти особенности подробнее.

2.1. Многоканальность измерительных систем

Первое, что бросается в глаза при рассмотрении реальных ИС, это наличие по крайней мере нескольких каналов измерения, предназначенных либо для измерения разнородных физических величин (например, при измерении тепловой энергии), либо для измерения однородных физических величин (например, при измерении электрической энергии).

Существует огромное разнообразие первичных измерительных преобразователей (ПИП), используемых для преобразования измеряемой физической величины, действующей на входе измерительного канала, в электрический сигнал, поступающий в ИС. С учетом обилия ПИП, оснащенных различными устройствами вывода сигналов, возможен ряд конструктивных вариантов построения измерительных каналов ИС. Простейший вариант построения измерительных каналов ИС (ИК) представлен на рис. 2.1.

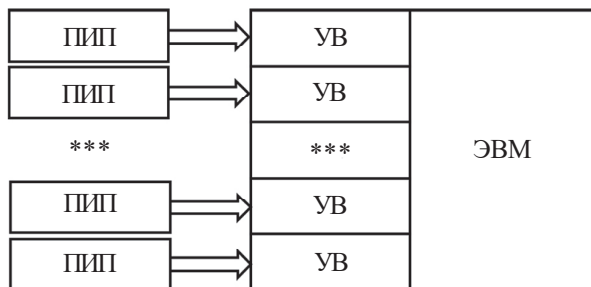


Рис. 2.1. Простейший вариант построения ИС:
УВ – устройства ввода сигналов ПИП в ЭВМ

Представленный на рис. 2.1 вариант построения ИК предполагает использование небольшого количества ПИП и обычно используется для автоматизации лабораторных измерений. Недостатком подобного варианта является относительно небольшое число ИК, которые могут быть подключены непосредственно к ЭВМ.

Для увеличения числа ИК в распределенных ИС для сбора измерительной информации часто используют программируемые контроллеры (ПК) [16]. Такой ПК, в отличие от ЭВМ, имеет ограниченный набор функций, специальное конструктивное исполнение, расширенный диапазон рабочих температур и увеличенное количество портов ввода/вывода информации.

Типичный пример построения ИК с использованием ПК представлен на рис. 2.2. В случае, когда в качестве ПИП используются счетчики электрической энергии с импульсным интерфейсом, ПК системы имеют особенно простой вид. Каждый ПК, который в этом случае называют устройством сбора данных (УСД), представляет собой многоканальный счетчик импульсов, поступивших по каждому из входов. Накопленные данные о количестве импульсов, поступивших по каждому входу, УСД с заданной периодичностью передает по цифровому интерфейсу на ЭВМ. ЭВМ обеспечивает прием и обработку полученных данных, их хранение в базе данных в виде количества электрической энергии, измеренной каждым счетчиком за заданный интервал времени (обычно это 15 с, 3, 15,

30, 60 мин, 1 сутки, 1 месяц), и выдачу результатов измерений электрической энергии и мощности в виде таблиц, ведомостей, графиков на видеомонитор и (или) печать.

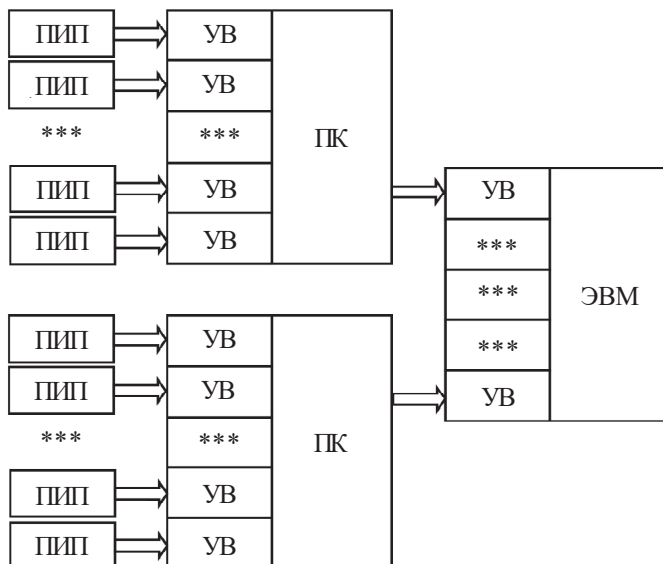


Рис. 2.2. Вариант построения ИС с использованием ПК

Как видно из рис. 2.2, количество ИК в данном случае может быть существенно большим, чем в представленном на рис. 2.1 случае.

2.2. Временная синхронизация процессов измерений

Существует широкий круг потребителей, для которых важна «привязка» (синхронизация) контролируемых ими промышленных процессов к единому времени. В частности, для расчета измеряемой тепловой мощности и энергии необходимы одновременные измерения температуры, давления и расхода теплоносителя в заданные моменты времени. Баланс потребления и расхода электричес-

кой энергии также может быть получен только при наличии привязанных к заданным моментам времени результатов измерения электрической энергии.

2.2.1. О важности синхронизации процессов измерений в ИС

Рассмотрим недостатки, обусловленные отсутствием синхронизации процессов измерения, на примере измерительной системы учета электрической энергии с импульсным интерфейсом передачи измерительной информации, представленной на рис. 2.2. База данных такой ИС формируется на основе результатов измерений, поступающих от УСД системы за установленные интервалы времени, измеренные по часам ПЭВМ. При этом в соответствии с действующими требованиями [17, 18] показания часов ПЭВМ системы должны быть привязаны к национальной шкале координированного времени UTC (SU) [19] с точностью не хуже ± 5 с/сут. В отсутствие синхронизации отклонение показаний часов ПЭВМ от шкалы времени UTC (SU) может достигать 30 с/сут, что искажает структуру электропотребления на объекте.

Кроме того, отсутствие синхронизации времени в ИС приводит при передаче измерительной информации к дополнительным погрешностям, которые обусловлены несовпадением фактических значений периода вывода информации из УСД – $T_{\text{УСД}}$ и периода записи принятой информации в ПЭВМ – $T_{\text{ПЭВМ}}$. При подготовке ИС к работе номинальные значения этих периодов устанавливаются равными: $T_{\text{УСД}} = T_{\text{ПЭВМ}}$. Однако при отсутствии синхронизации фактические значения периодов $T_{\text{УСД}}$ и $T_{\text{ПЭВМ}}$ в процессе работы ИС расходятся между собой: $T_{\text{УСД}} \neq T_{\text{ПЭВМ}}$.

Рассмотрим ситуацию, когда фактическое значение $T_{\text{УСД}} > T_{\text{ПЭВМ}}$. Пусть в начальный момент времени левые границы этих двух интервалов времени совпадают (см. рис. 2.3). По окончании первого периода времени по часам ПЭВМ начало интервала времени формирования посылки в УСД сдвинется на интервал времени $\Delta T = T_{\text{УСД}} - T_{\text{ПЭВМ}}$. За n периодов записи информации этот сдвиг времени составит $n \cdot \Delta T$. Когда этот сдвиг превысит значение $T_{\text{ПЭВМ}}$,

очередная посылка УСД попадет в следующий за очередным периодом интервал времени $T_{\text{ПЭВМ}}$ (см. рис. 2.3), т. е. имеет место т. н. «потеря» посылки. Нетрудно оценить, что «потеря» посылки имеет место при условии

$$n \cdot \Delta T = n \cdot (T_{\text{УСД}} - T_{\text{ПЭВМ}}) \geq T_{\text{ПЭВМ}}$$

или

$$n \geq T_{\text{ПЭВМ}} / (T_{\text{УСД}} - T_{\text{ПЭВМ}}).$$

Как видно из последней формулы, при наличии синхронизации, когда $T_{\text{УСД}} = T_{\text{ПЭВМ}}$, «потеря» посылки отсутствует ($n \rightarrow \infty$).

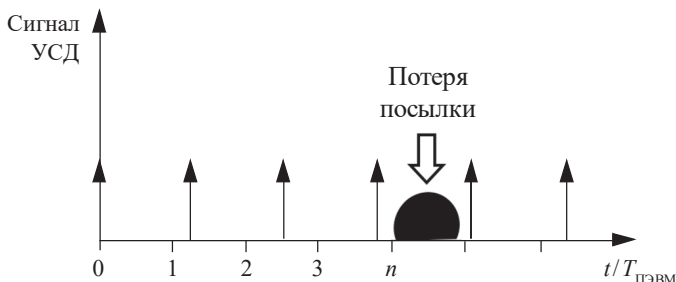


Рис. 2.3. Схема формирования «потери» посылки при $T_{\text{УСД}} > T_{\text{ПЭВМ}}$

Оценим возникающую при «потере» посылки погрешность. Пусть период передачи посылок $T_{\text{УСД}} = 15$ с. При равномерной измеряемой нагрузке каждая посылка содержит информацию об одном и том же количестве энергии. Потеря посылки в некотором получасовом интервале означает уменьшение результата измерения за этот получасовой интервал на величину порядка $15/1800 \cdot 100\% \approx 1\%$, т. е. погрешность измерения энергии за рассматриваемый получасовой интервал возрастает на 1%.

Аналогичная ситуация имеет место и при $T_{\text{УСД}} < T_{\text{ПЭВМ}}$. Если опять рассмотреть ситуацию, когда начало отсчетов периодов $T_{\text{УСД}}$ и $T_{\text{ПЭВМ}}$ совпадают, то уже в первый период времени по часам ПЭВМ в силу условия $T_{\text{УСД}} < T_{\text{ПЭВМ}}$ будут зарегистрированы две посылки УСД, т. е. вместо «потери» посылки, имевшей место при предыдущем рассмотрении, имеет место «лишняя» посылка.

Иначе говоря, и в этом случае отсутствие синхронизации часов УСД и ПЭВМ ведет к дополнительным погрешностям при передаче измерительной информации.

2.2.2. Основные методы синхронизации процессов измерений в ИС

В настоящее время единство измерений времени обеспечивается в основном путем использования эталонных сигналов частоты и времени (ЭСВЧ), которые являются средством передачи размеров единиц и шкал времени [20] и представляют собой несущие колебания, модулированные по амплитуде, фазе или частоте сигналами, содержащими временные метки шкалы времени, а также информацию о текущих значениях времени, дате и другую дополнительную информацию. Одно из возможных направлений использования ЭСВЧ – синхронизация встроенных часов отдельных компьютеров, цифровых измерительных систем и компьютерных сетей.

ЭСВЧ обеспечивают передачу размеров единиц времени, частоты и национальной шкалы координированного времени UTC (SU) от государственного первичного эталона к эталонам и рабочим СИ с целью обеспечения единства измерений времени и частоты в стране. Для передачи ЭСВЧ действующая в стране [21] Государственная служба времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) использует разветвленную сеть средств передачи, которая включает в себя:

- радиостанции, работающие в диапазонах СДВ, ДВ и КВ [22], как специализированные, предназначенные только для передачи эталонных сигналов, так и другого назначения (радионавигационные, связные, звукового вещания, телевизионные), передающие ЭСВЧ на вторичной основе и обеспечивающие согласование показаний часов потребителя с национальной шкалой координированного времени UTC (SU);

- средства передачи точного времени через глобальную сеть Интернет, а также

- глобальные навигационные спутниковые системы ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США).

Наиболее простым методом синхронизации времени является прием сигналов проверки времени (СПВ «6 точек»), передаваемых по сети звукового вещания. Эти сигналы предназначены для проверки показаний и автоматической синхронизации часов технического и бытового назначения. Они представляют собой группу из шести радиоимпульсов с частотой заполнения 1 000 Гц. Первые пять импульсов имеют длительность 100 мс каждый. Длительность шестого импульса изменяется в зависимости от значения часа суток московского времени от 100 до 560 мс через 20 мс в соответствии с выражением

$$T = (100 + 20 \cdot h) \text{ мс},$$

где h – текущее значение часа. Начало шестого импульса соответствует началу часа.

К сожалению, рассматриваемый метод синхронизации не лишен недостатков. Согласно бюллетеню Главного метрологического центра ГСВЧ Г-85 от 10.03.2006 г. совпадение временного положения начала шестого сигнала проверки времени со шкалой времени UTC (SU) с погрешностью, не превышающей 0,3 с, гарантируется только в зоне непосредственного приема передатчиков радиовещательных станций «Маяк» и «Радио России» г. Москвы в УКВ, FM, ДВ и СВ диапазонах. В удаленных от Москвы регионах задержки при передачах на регионы России сигналов проверки времени «6 точек» через радиовещательные станции «Маяк» и «Радио России» непредсказуемы и могут достигать (3 ÷ 4) с.

Более точный метод синхронизации основан на приеме ЭСВЧ в сети Интернет. Бюллетень Главного метрологического центра ГСВЧ Г-81 от 20.04.2005 г. извещает о вводе в эксплуатацию трех тайм-серверов первого уровня (Stratum 1), доступных в сети Интернет. Все три тайм-сервера работают от сигналов рабочей шкалы Государственного эталона времени и частоты РФ. Их адреса в Интернете:

ntp1.imvp.ru; ntp2.imvp.ru; ntp3.imvp.ru.

Системное время тайм-серверов согласовано с UTC (SU) с погрешностью, не превышающей 10 мкс. Однако погрешность син-

хронизации системных часов компьютеров абонентов определяется в основном разностью времени прохождения сигнала между компьютером абонента и тайм-сервером в прямом и обратном направлении. Эта разность обычно составляет величину порядка $(10 \div 20)$ мс и, вообще говоря, должна контролироваться в процессе работы.

2.2.3. Принципы функционирования глобальной навигационной спутниковой системы

Первый в истории искусственный спутник Земли был запущен в СССР в 1957 г. Измерения доплеровского сдвига частоты передатчика этого спутника в пункте наблюдения с известными координатами позволили определить параметры движения этого спутника. Решение обратной задачи, т. е. определение координат пункта приема сигнала от спутника с известными координатами, по измерениям параметров принятого сигнала положило начало развитию глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). ГНСС обеспечивает потребителю в любой момент времени возможность определять пространственные координаты его местоположения, скорость движения потребителя и точное время на основе измерения расстояний от точки, в которой расположен потребитель, до нескольких навигационных спутников (НС) системы.

Измерение расстояния R до НС производится с помощью измерения времени распространения τ электромагнитных волн радиодиапазона от НС до приемника потребителя [23]. При этом декартовы координаты НС $(x_{\text{НС}}, y_{\text{НС}}, z_{\text{НС}})$ и приемника потребителя $(x_{\text{пр}}, y_{\text{пр}}, z_{\text{пр}})$ связаны со временем распространения сигнала τ соотношением

$$R \equiv \sqrt{(x_{\text{НС}} - x_{\text{пр}})^2 + (y_{\text{НС}} - y_{\text{пр}})^2 + (z_{\text{НС}} - z_{\text{пр}})^2} = c \cdot \tau, \quad (2.1)$$

где c – скорость света.

Предполагая, что сигнал излучается передатчиком НС в момент $T_{\text{изл}}$ и регистрируется приемником потребителя в момент $T_{\text{пр}}$, время распространения сигнала в (2.1) можно определить соотношением $\tau = (T_{\text{пр}} - T_{\text{изл}})$.

Однако последнее соотношение справедливо только при условии, что оба момента времени $T_{\text{пр}}$ и $T_{\text{изл}}$ выражены в одной и той же шкале времени. Реально же излучение сигнала фиксируется по часам, установленным на НС, а прием – по часам приемника потребителя. С учетом этого обстоятельства соотношение (2.1) требует уточнения.

Обозначим через $\Delta T_{\text{изл}}$ и $\Delta T_{\text{пр}}$ поправки часов НС и приемника, которые нужно добавить к их показаниям $T_{\text{изл}}$ и $T_{\text{пр}}$ соответственно, чтобы получить время по выбранной эталонной шкале времени, которую называют системной шкалой. С учетом этих обозначений формула (2.1) принимает вид:

$$\begin{aligned} R &= c \cdot [(T_{\text{пр}} + \Delta T_{\text{пр}}) - (T_{\text{изл}} + \Delta T_{\text{изл}})] = \\ &= c \cdot (T_{\text{пр}} - T_{\text{изл}}) + c \cdot (\Delta T_{\text{пр}} - \Delta T_{\text{изл}}) \end{aligned}$$

или

$$R = R^* + c\Delta\tau = \sqrt{(x_{\text{НС}} - x_{\text{пр}})^2 + (y_{\text{НС}} - y_{\text{пр}})^2 + (z_{\text{НС}} - z_{\text{пр}})^2}, \quad (2.2)$$

где $R^* = c \cdot (T_{\text{пр}} - T_{\text{изл}})$, $\Delta\tau = (\Delta T_{\text{пр}} - \Delta T_{\text{изл}})$.

В этой формуле R^* есть т. н. псевдодальность [23], рассчитанная с использованием показаний часов НС и приемника сигнала, значения которых получены в различных шкалах времени. Значение R^* отличается от действительной геометрической дальности R на величину $c\Delta\tau$, обусловленную влиянием поправок часов НС и приемника, которые к моменту измерений неизвестны.

Для обеспечения возможности функционирования ГНСС в реальном масштабе времени служба управления ГНСС ведет измерения поправок часов $\Delta T_{\text{изл}}$ и координат $x_{\text{НС}}$, $y_{\text{НС}}$, $z_{\text{НС}}$ каждого НС системы и обеспечивает передачу этих поправок потребителю вместе с сигналами НС. С учетом указанного обстоятельства из (2.2) получаем для j -го НС системы следующее уравнение:

$$R_j^* = R_j - c \cdot \Delta\tau_j = \sqrt{(x_{\text{НС}j} - x_{\text{пр}})^2 + (y_{\text{НС}j} - y_{\text{пр}})^2 + (z_{\text{НС}j} - z_{\text{пр}})^2}, \quad (2.3)$$

где $R_j^* = c \cdot (T_{\text{пр}} - T_{\text{изл}j})$, $\Delta\tau_j = (\Delta T_{\text{пр}} - \Delta T_{\text{изл}j})$.

Это и есть основное уравнение для решения навигационной задачи, т. е. определения координат и точного времени в точке расположения потребителя. В уравнении (2.3) четыре неизвестных: координаты положения приемника потребителя $x_{\text{пр}}$, $y_{\text{пр}}$, $z_{\text{пр}}$ и поправка часов приемника $\Delta T_{\text{пр}}$. Поэтому для их определения необходимо составить и решить систему из четырех таких уравнений ($j = 1, 2, 3, 4$), т. е. использовать наблюдения минимум четырех НС.

В качестве примера практического использования ГЛОНАСС приведем метрологические характеристики навигационного приемника МНП-МЗ (ГР № 38133-08). Приемник навигационный МНП-МЗ предназначен для измерения текущих координат и скорости потребителя в реальном масштабе времени, а также для формирования секундной метки времени с ее оцифровкой по сигналам ГЛОНАСС и GPS на основе приема сигналов НС.

Основные метрологические характеристики приемника:

- пределы допускаемой инструментальной погрешности приемника (при доверительной вероятности 0,95) измерений координат потребителя при скорости его движения от 0 до 1 200 км/ч ± 20 м;
- пределы допускаемой инструментальной погрешности приемника (при доверительной вероятности 0,95) формирования секундной метки времени, выдаваемой потребителю, по отношению к шкале времени UTC (SU) ± 100 нс.

Как видно из приведенного примера, прием сигналов НС ГНСС позволяет с высокой точностью проводить «привязку» часов потребителя к национальной шкале координированного времени UTC (SU).

2.3. Агрегатно-модульный принцип построения измерительных систем

Для современных измерительных систем (ИС) характерен агрегатно-модульный принцип построения, согласно которому разнообразные ИС комплектуются из стандартизованных элементов, выпускаемых отдельными независимыми производителями измерительных приборов и преобразователей, счетчиков импульсов, устройств накопления и регистрации информации, цифровых управляющих

устройств с соответствующим программным обеспечением. Возможность совместной работы указанных элементов в составе ИС обеспечивается еще на стадии проектирования путем включения соответствующих требований в стандарты общих технических условий, в соответствии с которыми эти элементы изготавливаются.

В частности, стандарт общих технических условий ГОСТ 22261 [24], определяющий общие требования к средствам измерения электрических и магнитных величин, устанавливает ряд обязательных требований к указанным СИ, и, в частности, требования:

- к условиям применения СИ;
- к метрологическим характеристикам СИ;
- к конструкции СИ и напряжению электропитания;
- к параметрам входных и выходных сигналов;
- к защите СИ от внешних электромагнитных воздействий.

Согласно [24] устанавливаются нормальные и рабочие условия применения СИ, а также предельные условия транспортирования.

Нормальные условия применения, представленные в табл. 2.1, используют для оценивания характеристик СИ или сравнения результатов измерений.

Значения влияющих величин в рабочих условиях применения и при предельных условиях транспортирования, характеризующие климатические и механические воздействия, представлены для СИ различных групп в табл. 2.2 и 2.3 соответственно.

Т а б л и ц а 2.1

Нормальные условия применения СИ

Влияющая величина	Нормальная область значений	Допускаемые отклонения
Температура окружающего воздуха, °С	20	$\pm 0,1^*$; $\pm 0,2^*$; $\pm 0,5$; ± 1 ; ± 2 ; ± 5 ; ± 10 ; $+10$ и -5
Относительная влажность воздуха, %	30–80	—
Атмосферное давление, кПа	84–106	—

О к о н ч а н и е т а б л . 2.1

Влияющая величина	Нормальная область значений	Допускаемые отклонения
Частота питающей сети, Гц	50 и/или 60	±0,5 или устанавливают в ТУ
	400	±10
Напряжение питающей сети, В: при частоте 50 Гц при частоте 400 Гц	По ГОСТ 21128 [9]	±4,4
	220 или 115	±4,4 или ±2,3
Форма кривой переменного напряжения питающей сети	Синусои- дальная	Коэффициент несинусои- дальности кривой напряже- ния не более 5 или 2** %

* Для мер электрического сопротивления класса точности 0,0005, 0,001, 0,002.

** Для приборов выпрямительной системы.

Т а б л и ц а 2.2

Рабочие условия применения СИ

Влияющая величина	Значение влияющей величины для СИ групп						
	1	2	3	4	5	6	7
<i>Климатические воздействия</i>							
Температура окружающего воздуха, °С:							
нижнее значение	10	10	5	–10	–30	–50	–30
верхнее значение	25	35	40	40, 55*	50	60	70
Относительная влажность воздуха, %	80 при 20 °С	80 при 25 °С	90 при 25 °С	90 при 30 °С	90 при 30 °С	95 при 35 °С	90 при 30 °С
Атмосферное давление, кПа	84–106,7 (70–106,7)*				60–106,7		

Влияющая величина	Значение влияющей величины для СИ групп						
	1	2	3	4	5	6	7
Механические воздействия на электронные СИ							
Вибрация: частота, Гц	Не устанавливают			10–55	10–70	10–150	10–70
Максимальное ускорение, м/с ²				2–30	2–40		
Механические удары: число ударов в минуту	Не устанавливают				10–50		
максимальное ускорение, м/с ²				100	150	250	50
длительность удара, мс				16	6		
число ударов				1 000	4 000		
Одиночные удары: максимальное ускорение, м/с ²	Не устанавливают			300	500		
длительность удара, мс				6	3		
число ударов				3			

* Для электронных измерительных приборов.

Нормируемые метрологические характеристики СИ устанавливают в соответствии с ГОСТ 8.009 [14]. Классы точности для СИ конкретного типа, выпускаемых в стране, должны соответствовать ГОСТ 8.401 [13]. В конструкцию СИ по требованию потребителя включают устройства, обеспечивающие автоматизацию измерений, самопроверку, контроль работоспособности, а также устройства для подключения внешней поверочной аппаратуры без демон- тажа СИ.

Предельные условия транспортирования СИ по [25]

Влияющая величина	Значение влияющей величины для СИ групп						
	1	2	3	4	5	7	6
Температура окружающего воздуха, °С	Условия хранения 3 или 5		Условия хранения 3 или 5 (от минус 25 до плюс 55 или от минус 50 до плюс 70)*				Условия хранения 3 или 5
Относительная влажность воздуха, %			Условия хранения 3 или 5 (95 при 25 °С или 95 при 30 °С)*				
Атмосферное давление, кПа	84–106,7 (70–106,7)*				60–106,7		
Транспортная тряска:							
число ударов в минуту	80–120						
максимальное ускорение, м/с ²	30						
продолжительность, ч	1				2		

* Для электронных измерительных приборов.

Электропитание СИ должно осуществляться от одного или нескольких источников электрической энергии, указанных ниже:

- от сети переменного тока частотой 50 и (или) 60 Гц по ГОСТ 21128 [9];
- от сети переменного тока частотой 400 Гц и напряжением 115 и (или) 220 В;
- от встраиваемых или внешних источников постоянного тока.

При питании СИ от сети переменного тока частотой 50 Гц устанавливают следующие рабочие условия применения:

- предельные отклонения напряжения по ГОСТ 32144 [26];
- предельные отклонения частоты питающей сети и содержание гармоник по ГОСТ 32144 [26], если в стандартах и (или) техни-

ческих условиях на СИ конкретного вида (типа) не установлены другие отклонения.

При питании средств измерений от сети переменного тока частотой 400 Гц устанавливают следующие рабочие условия применения:

- напряжение ($115 \pm 5,75$) В, и (или) (220 ± 11) В, и (или) (220 ± 22) В;
- отклонения частоты ± 10 Гц.

В соответствии с [24] значения параметров входных и выходных цепей СИ должны устанавливаться в стандартах и (или) технических условиях на СИ конкретного вида (типа). При этом значения сопротивлений входных и выходных согласованных цепей СИ должны быть выбраны из ряда: 0,1; 1; 5; 10; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 600 Ом; 1; 2; 5; 10; 20 кОм.

Необходимым условием надежной совместной работы компонентов измерительной системы является их электромагнитная совместимость [27], т. е. устойчивость к воздействию внешних электромагнитных помех. В частности, уровень промышленных радиопомех, создаваемых СИ, не должен превышать значений, установленных в ГОСТ Р 51318.22 [28]. Кроме того, СИ должны быть устойчивы к электростатическим разрядам по ГОСТ 30804.4.2 [29], наносекундным импульсным помехам по ГОСТ 30804.4.4 [30] и радиочастотным электромагнитным полям по ГОСТ Р 51317.4.3 [31]. Динамические изменения напряжения сети электропитания по ГОСТ 30804.4.11 [32] также не должны влиять на работу СИ.

2.4. ПЭВМ и прикладное программное обеспечение

Еще одна существенная особенность ИС – наличие встроенной ЭВМ с соответствующим программным обеспечением (ПО). В качестве ЭВМ в современных системах обычно используются высокопроизводительные персональные ЭВМ (ПЭВМ). Рассмотрим основные конструктивные особенности современных ПЭВМ.

2.4.1. Основные характеристики ПЭВМ

Первые ПЭВМ появились в конце 1970-х гг. В частности, фирмой IBM был выпущен персональный компьютер IBM PC (PC – Personal Computer – персональный компьютер), который очень быстро завоевал огромную популярность во всем мире благодаря своей низкой стоимости и удобствам работы с ним. В настоящей работе в соответствии с принятой в стране терминологией [33] вместо термина «персональный компьютер» используется его российский синоним «ПЭВМ».

Любая IBM PC-совместимая ПЭВМ состоит [34] из блока управления, арифметико-логического устройства (АЛУ), памяти (устройств хранения) и устройств ввода-вывода. Выполняемые ПЭВМ действия определяются блоком управления и АЛУ, которые вместе образуют центральный процессор. Центральный процессор выбирает и исполняет команды из памяти последовательно, адрес очередной команды задается «счетчиком адреса» в блоке управления. Процессор имеет набор быстродействующих регистров (ячеек памяти), которые используются для ускорения обмена между АЛУ и блоком управления и позволяют увеличить скорость вычислений.

Все компоненты ПЭВМ представляются для центрального процессора в виде наборов ячеек памяти и портов ввода-вывода.

Память ПЭВМ включает в себя ряд компонентов:

- оперативная память (ОЗУ) – самый большой массив ячеек памяти, непосредственно доступный процессору для записи и чтения данных, а также для считывания программного кода;
- постоянная память (ПЗУ), из которой возможно только считывание команд и данных;
- энергонезависимая память BIOS (Basic Input-Output System), в которой хранится базовая система ввода-вывода, содержащая информацию о конкретной аппаратной конфигурации ПЭВМ. С учетом этой информации BIOS обеспечивает диагностику ПЭВМ при включении и взаимодействие прикладных программ с компонентами ПЭВМ. Физически BIOS хранится в микросхемах (ROM BIOS), которые могут перепрограммироваться при изменении аппаратной конфигурации ПЭВМ;

- память ПЭВМ дополняется устройствами хранения данных, например, накопители на жестких магнитных дисках (НЖМД). В отличие от ОЗУ и ПЗУ, центральный процессор не имеет непосредственного доступа к устройствам хранения данных, доступ к которым осуществляется с помощью специальных программ.

Устройства ввода-вывода (УВВ) ПЭВМ служат для преобразования информации из внутреннего представления в компьютере (биты и байты) в форму, доступную окружающим, и обратно. К традиционным устройствам ввода относятся клавиатура, мышь, к устройствам вывода – дисплей, принтер.

Существует также большой класс коммуникационных устройств ПЭВМ – универсальные порты ввода-вывода, к которым можно подключать любые устройства по выбору потребителя. В числе первых универсальных портов были т. н. последовательный порт СОМ-порт (Communication port) и параллельный порт LPT-порт (Line Printer Terminal – линия подключения принтера), отличающиеся способом передачи данных между ПЭВМ и внешним устройством. Последовательный порт передает данные бит за битом, т. е. передаваемые биты информации проходят через порт последовательно по одному биту. Параллельный порт передает информацию целыми байтами (группами битов), т. е. через порт одновременно проходит весь байт.

К последовательным портам относятся и т. н. универсальные USB-порты (Universal Serial Bus – «универсальная последовательная шина»), которые получили в настоящее время широкое распространение. USB-порты удобны еще и тем, что от них автономные внешние устройства (внешние накопители на жестких дисках, флешки, плееры и другие устройства) могут получать электрическое питание, что упрощает такие устройства и делает их меньшими по размерам и энергонезависимыми от электрических сетей.

2.4.2. Структура программного обеспечения ПЭВМ

Перечисленные выше аппаратные средства IBM PC-совместимой ПЭВМ не имеют практической ценности без программного обеспечения (ПО), которое имеет многоуровневую организацию [34].

Нижним уровнем ПО является упоминавшаяся выше базовая система ввода-вывода BIOS, которая хранится в ROM BIOS. Эта система содержит процедуры для работы со стандартными устройствами и обеспечивает, например, ввод символов с клавиатуры, вывод на экран или принтер, чтение/запись информации на диск и т. п.

Следующий уровень ПО – операционная система (ОС), основным назначением которой является загрузка прикладных программ. Для загрузки ОС требуется системный диск. В самом начале системного диска располагается загрузчик – короткая программа, загружающая несколько файлов ядра операционной системы в память ПЭВМ и передающая им управление. После загрузки этих файлов работой компьютера управляет ОС, она загружает все свои компоненты, выполняет нужные настройки и становится готовой для загрузки и исполнения приложений.

Верхний уровень иерархии ПО – прикладное ПО, ради использования которого и создан компьютер. Прикладные программы могут пользоваться ОС, BIOS, а также обращаться к аппаратным средствам компьютера напрямую, адресуясь к портам и ячейкам памяти. Прикладное ПО является неотъемлемой частью измерительной системы и предназначено для обработки результатов измерений в реальном масштабе времени. Учитывая, что прикладное ПО СИ может влиять на результаты измерений, в ГОСТ Р 8.654 [35] сформулированы обязательные требования к ПО СИ, применяемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. В число указанных требований входит оценка в необходимых случаях влияния ПО на метрологические характеристики СИ.

2.4.3. Методы оценки влияния ПО на метрологические характеристики СИ

Степень влияния ПО на метрологические характеристики СИ оценивают методами испытаний (тестирования) ПО, обзор которых представлен в ряде работ [36–38].

Согласно [37] основными методами, применяемыми при оценке влияния ПО на метрологические характеристики СИ, являются:

- метод испытаний с применением «эталонного» ПО (аналог сличения эталонных СИ), основанный на сравнении результатов,

полученных тестируемым и «эталонным» ПО при обработке одних и тех же исходных данных, поступающих на обработку;

- метод генерации «эталонных» исходных данных, в рамках которого на основании априорной информации о модельном решении рассматриваемой измерительной задачи готовят «модельные» данные, соответствующие этому решению, и сравнивают эти «модельные» данные с результатами тестирования аттестуемого ПО с помощью «эталонных» исходных данных, формируемых специальной программой – генератором данных под воздействием указанных «модельных» данных;

- сличение программ сопоставимого уровня вычислительных возможностей;

- испытания на основе анализа исходного кода ПО, а также комбинации указанных методов;

- метод аттестации с использованием моделей исходных данных, представляющий собой вариант метода генерации «эталонных» исходных данных, в котором эти данные не генерируются специально разработанной программой, а программно задаются на входе тестируемого ПО.

Следует заметить, что практическая реализация каждого из указанных методов вызывает определенные трудности. В частности, метод испытаний с применением «эталонного» ПО предполагает использование «эталонного» ПО, под которым понимают ПО, отвечающее высшим требованиям к его вычислительным и функциональным характеристикам, подтвержденным (в ряде случаев независимыми методами) при его неоднократном тестировании и применении. Иначе говоря, возможность использования такого ПО в рассматриваемой задаче требует отдельного независимого исследования. Метод генерации «эталонных» исходных данных требует разработки программы – генератора данных, применимость которой также должна быть обоснована.

При сличении программ сопоставимого уровня вычислительных возможностей на их входы подаются одинаковые наборы «эталонных» исходных данных и сравниваются соответствующие тестовые результаты. Как и в методе испытаний с применением «эта-

лонного» ПО, возможность использования каждой из программ, используемой для сличения, требует соответствующего обоснования.

Методы испытаний на основе анализа исходного кода ПО, а также комбинации указанных методов рекомендованы в документах МОЗМ [39] и ЕС [40] и представлены в российской литературе соответственно идентичным стандартом ГОСТ Р 8.839 [36] и Справочной книгой [41], в которой рассматривается 1-е издание указанного в [40] документа. Методы испытаний на основе анализа исходного кода ПО характеризуются значительными трудозатратами и могут быть рекомендованы при необходимости углубленной проверки тестируемого ПО.

Метод аттестации с использованием моделей исходных данных, в отличие от перечисленных выше, не создает указанных трудностей и используется в настоящей работе для демонстрации основных подходов к оценке влияния ПО на метрологические характеристики СИ. Метод может быть использован для обоснования целесообразности применения алгоритма (программы) для решения конкретной измерительной задачи, а также при разработке нормативно-технических документов, регламентирующих обработку данных при измерениях, и методик (методов) измерений. Аттестация алгоритма может представлять собой первый этап аттестации программы. Рассмотрим последний метод подробнее.

Метод аттестации

с использованием моделей исходных данных

Метод аттестации с использованием моделей исходных данных предложен в [42] для оценки характеристик точности, устойчивости и сложности конкретного алгоритма и (или) реализующей его программы обработки данных при измерениях. Алгоритм обработки данных при измерениях определяется в [42] как последовательность арифметических и логических операций, производимых над результатами наблюдений (с учетом априорной информации) с целью определения результата измерения и характеристик его погрешности. Нетрудно заметить, что такое определение алгоритма обработки данных фактически эквивалентно определению

уравнения измерений, приведенному в [1]. В свою очередь, программа обработки данных при измерениях, которая входит в состав аттестуемого ПО, определяется в [42] как самостоятельный объект, являющийся конкретной программной реализацией алгоритма обработки данных.

Для проведения аттестации ПО рассматриваемым методом разрабатывают в соответствии с рекомендацией [43] методику аттестации, содержащую детальное описание всех действий, выполняемых в процессе аттестации. Методика должна включать, в частности, методику оценки характеристик точности, устойчивости и сложности, устанавливаемых для конкретного алгоритма (программы), а также критерии, позволяющие оценить соответствие аттестуемого ПО предъявляемым требованиям. В число характеристик точности аттестуемого алгоритма (программы) обработки данных включают перечисленные ниже составляющие погрешности результата измерения, возникающие при обработке экспериментальных данных с использованием аттестуемого ПО:

- методическая погрешность результата измерения, обусловленная неидеальностью алгоритма обработки данных, которая получается при применении алгоритма к точным (не содержащим погрешностей) исходным данным при условии точного выполнения всех арифметических и логических операций;
- трансформированная погрешность результата измерения, обусловленная наличием погрешностей исходных данных и их преобразованиями при обработке;
- составляющие погрешности результата измерений, обусловленные особенностями работы программы в конкретной вычислительной среде, включая округление промежуточных и окончательных результатов вычислений, ограниченность разрядной сетки и т. п.

При оценке влияния аттестуемого ПО на результаты измерений с использованием рассматриваемого метода рекомендуется придерживаться следующей последовательности выполнения этапов работ.

Этап 1. Установить критерии, позволяющие оценить соответствие аттестуемого ПО предъявляемым требованиям.

Этап 2. Установить основные характеристики Π_1, \dots, Π_n алгоритма (программы), которые следует оценивать при аттестации (n – общее число характеристик).

Это могут быть:

- характеристики точности аттестуемого алгоритма (программы), к которым относятся, в частности, перечисленные выше составляющие погрешности результата измерения, возникающие при обработке экспериментальных данных;
- характеристики устойчивости, которые задают область работоспособности алгоритма (программы), например, границы интервалов (областей) значений параметров исходных данных, в которых алгоритм (программа) работает без сбоев (грубых ошибок);
- характеристики сложности аттестуемого ПО, которые отражают объем вычислений при реализации ПО, например, интервал времени работы ЭВМ при однократном выполнении программы. Уменьшение сложности аттестуемого ПО означает уменьшение числа вычислительных операций и, следовательно, уменьшение влияния округления промежуточных результатов вычислений на конечный результат.

Этап 3. Установить набор моделей исходных данных u_1, \dots, u_m , поступающих на обработку (m – общее число моделей). Модели исходных данных выбираются как сочетания моделей полезных сигналов и моделей погрешностей исходных данных. Модели полезных сигналов формируют на основе постановки измерительной задачи, используя уравнение измерений и сведения о свойствах входных сигналов СИ. Модели погрешностей исходных данных формируют с учетом постановки измерительной задачи и характеристик возможных помех. В результате модели исходных данных должны максимально соответствовать решаемой измерительной задаче и охватывать как можно больший диапазон возможных значений, поступающих на обработку.

Этап 4. Вычислить значения π_{ij} выбранных характеристик алгоритмов (программ) Π_i на выбранных моделях исходных данных u_j с использованием аттестуемого ПО:

$$\pi_{ij} = \Pi_i(u_j).$$

Этап 5. Оценить соответствие полученных оценок значений основных характеристик аттестуемого ПО установленным критериям, а также целесообразность применения алгоритма (программы) для решения конкретной измерительной задачи и (или) при разработке нормативно-технических документов, регламентирующих обработку данных при измерениях и методик (методов) измерений.

В Приложении приведен пример оценки методом аттестации с использованием моделей исходных данных методической составляющей погрешности измерения электрической энергии, обусловленной алгоритмом обработки данных статического счетчика электрической энергии.

2.5. Аппаратура и каналы связи измерительных систем

Еще одна существенная особенность современной ИС – наличие каналов связи и соответствующей аппаратуры для передачи измерительной информации между компонентами системы. Типовая схема канала связи ИС представлена на рис. 2.4.

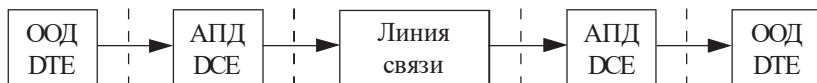


Рис. 2.4. Типовая схема канала связи

На рис. 2.4 в соответствии с [44] приведены обозначения следующих стандартизованных терминов и их иностранных эквивалентов на английском языке, установленных в области передачи данных:

- ООД (оконечное оборудование данных) = Data terminal equipment (DTE);
- АПД (аппаратура передачи данных) = Data communication equipment (DCE).

Канал связи предназначен для обмена сообщениями между двумя компонентами ИС и в общем случае включает в себя линию связи, технические средства приема и передачи данных с соот-

ветствующим программным обеспечением. В зависимости от характера, принципа построения, назначения и использования различают каналы проводной, оптоволоконной, радио-, телефонной, телеграфной, компьютерной, аналоговой, цифровой связи и т. д.

В качестве ООД канала связи используют источники или приемники информации, например, ЭВМ, принтер, плоттер и т. д., а в качестве АПД могут служить модемы, приемопередатчики и т. п. Линия связи канала представляет собой физическую среду, по которой осуществляется передача данных. В простейшем случае она представляет собой двухпроводную линию связи или телефонный коммутируемый канал связи с соответствующим оборудованием.

Различают следующие разновидности каналов связи [45]:

- выделенный, представляющий собой канал связи (в том числе телефонной), постоянно закрепленный за источниками приема и передачи информации;
- дуплексный, представляющий собой канал связи, способный принимать и передавать данные одновременно в обоих направлениях по линии связи;
- полудуплексный, представляющий собой канал связи, способный принимать и передавать информацию в двух направлениях. Однако в каждый отдельно взятый момент времени передача или прием данных производится только в одном направлении;
- оптоволоконный канал – сверхвысокоскоростная технология дуплексной передачи данных с малой задержкой на расстояние до 10 км. Несмотря на наименование, физической средой передачи такого канала может быть не только оптическое волокно, но и коаксиальный кабель или витая пара;
- канал беспроводной связи, который использует в качестве среды передачи данных электромагнитное излучение (как правило, СВЧ-излучение с частотой 2–3 ГГц) или оптическое излучение (как правило, инфракрасного диапазона).

Функционирование канала связи как единого целого предполагает обмен различного рода сигналами через границу раздела между компонентами, показанную пунктиром на рис. 2.4. Технически такой обмен осуществляется с использованием интерфейса [45], ко-

торый представляет собой совокупность технических, программных средств и правил (протоколов обмена сигналами), обеспечивающую взаимодействие компонентов системы между собой.

Применительно к каналам связи различают [45] пользовательские интерфейсы и интерфейсы ввода-вывода, обеспечивающие стандартное сопряжение средств управления внешними устройствами (например, с помощью ПЭВМ) с каналами ввода-вывода информации.

Пользовательский интерфейс обеспечивает взаимодействие пользователя с системой. Например, графический интерфейс пользователя представляет собой тип интерфейса, организованный таким образом, что сведения об используемых программах, файлах, режимах работы (опциях) и т. п. отображаются на экране монитора в виде графических символов (пиктограмм), а также связанных с ними всплывающих меню. Выбор и активизация необходимого варианта обычно осуществляются мышью. Данные при этом отображаются в прямоугольных зонах экрана (окнах), которыми оператор может манипулировать различным образом. Графический интерфейс пользователя применяется в операционной среде Windows для IBM-совместимых ПЭВМ и может быть использован для реализации ООД канала связи на базе такой ПЭВМ.

Интерфейсы ввода-вывода определяют способы автоматического сопряжения устройств канала связи между собой. В зависимости от конкретной решаемой задачи различают параллельный и последовательный интерфейсы [34]:

- параллельный интерфейс, в котором для каждого бита передаваемого байта (группы бит) используется своя линия связи (обычно с двоичным представлением), и все биты группы передаются одновременно за один квант времени. Примеры: параллельный порт подключения принтера (LPT-порт, 8 битов), шина расширения PCI (32 или 64 бита), обеспечивающая подключение к ПЭВМ обычно до шести периферийных устройств;

- последовательный интерфейс, в котором используется лишь одна линия связи и биты байта передаются друг за другом по очереди; на каждый из них отводится свой квант времени (битовый ин-

тервал). Примеры: коммуникационный порт (COM-порт) и последовательная шина USB, предназначенные для подключения к ПЭВМ внешних модемов, мониторов и т. п.

Обычно LPT-порт используется для подключения принтера, однако этим его применение не исчерпывается. Он может использоваться [34] для связи двух компьютеров по параллельному интерфейсу, подключения сканера или устройств ввода-вывода.

Начиная с первых моделей ПЭВМ в их состав включался коммуникационный порт (COM-порт), обеспечивающий последовательную передачу данных и некоторых специальных сигналов в дуплексном канале связи между DTE и DCE по стандарту RS-232C. В настоящее время COM-порт пока еще широко используется для подключения специального или устаревшего оборудования к ПЭВМ, хотя постепенно вытесняется интерфейсом USB.

Интерфейс USB (англ. Universal Serial Bus – универсальная последовательная шина) представляет собой современный последовательный интерфейс передачи данных для среднескоростных и низкоскоростных периферийных устройств цифровой техники [34]. В отличие от параллельного интерфейса, кабельное хозяйство интерфейса USB простое и изящное. Кабель USB содержит одну экранированную пару проводов для сигнальных цепей и одну неэкранированную пару для подачи питания напряжением плюс 5 В. Назначение выводов разъемов USB иллюстрирует табл. 2.4.

Т а б л и ц а 2.4

Назначение выводов разъема USB

Контакт	Цепь	Назначение
1	V_{BAS}	+5 В для питания периферийных устройств
2	D ⁻	Передача данных
3	D ⁺	Передача данных
4	GND	Цепь «корпуса» для питания периферийных устройств

В настоящее время существует уже достаточно много устройств с интерфейсом USB. Первоначально (в версиях 1.0 и 1.1) интерфейс обеспечивал две скорости передачи информации: низкую скорость – 1,5 Мбит/с и полную скорость – 12 Мбит/с. В версии 2.0, опубликованной в начале 2000 г., определена еще и высокая скорость – 480 Мбит/с, которая позволяет существенно расширить круг устройств, подключаемых в соответствии с этим интерфейсом. Спецификацией USB 3.0 определена скорость передачи информации до 5 Гбит/с. В одной и той же системе могут присутствовать и одновременно работать устройства со всеми четырьмя скоростями. Интерфейс позволяет соединять устройства, удаленные от ПЭВМ на расстояние до 25 м.

Цифровые интерфейсы позволяют организовать связь между компонентами системы, оснащенными встроенным программным обеспечением, с помощью сетей различной конфигурации (различной топологии). Для измерительных систем обычно реализуются две конфигурации сети: топология «звезда» (рис. 2.5) и топология «общая шина» (рис. 2.6).

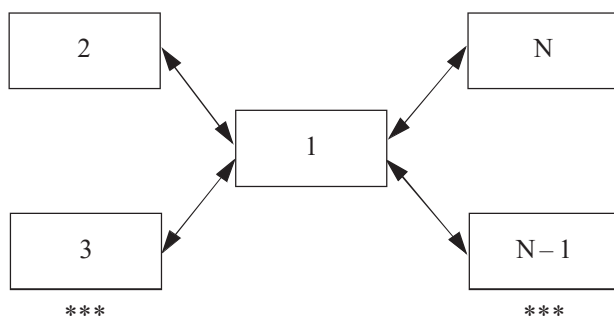


Рис. 2.5. Звездообразное соединение компонентов
(топология «звезда»)

В структуре, представленной на рис. 2.5, все компоненты подключаются к одному центральному компоненту 1 – серверу системы. Сигналы от сервера системы поступают ко всем другим компонентам. Основное преимущество рассматриваемой топологии –

высокая надежность. Выход из строя одного или нескольких компонентов не приводит к потере работоспособности остальной части системы. Однако неисправность сервера приводит к полной потере работоспособности сети. Для достаточно простой ИС в качестве компонента 1 выступает ПЭВМ, а в качестве остальных компонентов – первичные измерительные преобразователи системы, как это показано на рис. 2.1. В более сложных системах (см. рис. 2.2) в качестве компонентов с номерами $2 \div N$ выступают программируемые контроллеры системы, к каждому из которых подключены по топологии «звезда» свои измерительные преобразователи системы.

Звездообразное соединение компонентов используется обычно в локальных (местных) измерительных системах, функционирующих в пределах одного предприятия при максимальном расстоянии между компонентами не более 1 км. В более крупных системах используется обычно топология «общая шина», представленная на рис. 2.6.

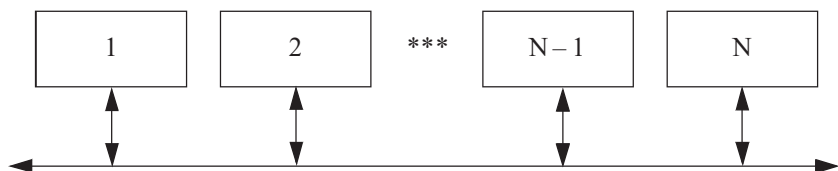


Рис. 2.6. Параллельное подключение компонентов
(топология «общая шина»)

В структуре, представленной на рис. 2.6, все компоненты сети подключены к одному кабелю, который называется «общей шиной». В такой сети данные в виде электрических сигналов передаются по общей шине всем компонентам сети, но принимает их только тот компонент, адрес которого совпадает с адресом получателя, который передается вместе с данными. Выход одного или нескольких компонентов из строя в сети с топологией «общая шина» практически не сказывается на работе сети. При этом каждый из показанных на рис. 2.6 компонентов системы может представ-

лять собой локальную подсистему, функционирующую в пределах одного предприятия, микрорайона и организованную, как правило, в соответствии с рис. 2.5.

Для организации связи между компонентами при любой топологии системы необходимо договориться о правилах функционирования каналов связи измерительных систем, включая требования к стандартизации входных и выходных сигналов каналов связи и правилам организации обмена информацией между компонентами системы – протоколам обмена, к рассмотрению которых мы и переходим.

Глава 3

СТАНДАРТИЗАЦИЯ ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Агрегатно-модульный принцип построения измерительных систем (ИС), о котором шла речь в предыдущей главе, предполагает комплектацию ИС стандартизованными компонентами, характеристики которых удовлетворяют ряду обязательных требований. В число таких требований входят, в частности, требования к характеристикам входных и выходных сигналов, используемых для передачи измерительной информации. Рассмотрим эти требования подробнее.

3.1. Основные проблемы передачи измерительной информации в измерительных системах

В соответствии с [46] информация есть совокупность сведений об объектах (людях, событиях, процессах, явлениях), рассматриваемая с позиций передачи этих сведений в пространстве и во времени. Соответственно измерительная информация есть информация о значениях физических величин, полученных в процессе измерений.

Информационными технологиями называют совокупность процедур формирования, сбора, передачи, преобразования, хранения, измерения, обработки и других процедур обработки информации, выполняемых, в том числе, с помощью технических средств.

Информацию передают в виде сообщений. Сообщение – это информация, выраженная в определенной форме и предназначенная для передачи от источника к потребителю информации. Примерами сообщений служат тексты документов, результаты измере-

ний на выходе средства измерений или измерительной системы и т. п. Для передачи сообщений необходимы материальные носители информации – сигналы. Сигнал представляет собой физический процесс, параметры которого способны отображать сообщение. Обычно рассматривают электрические сигналы [47–49] – сигналы тока и напряжения. Однако в качестве сигналов могут использоваться и другие физические процессы – гидравлические [50], пневматические [51] и т. п.

Проблемы, возникающие при передаче информации в канале связи, нетрудно понять из рассмотрения структуры канала, представленной на рис. 3.1. Для определенности будем говорить об электрическом канале передачи информации, например, электрическом телеграфе, с которого фактически и началась теория информации и передачи сигналов.

Источником информации в таком случае выступает клиент телеграфа, который отправляет свое сообщение потребителю. Для отправки сообщения используется ООД (Оконечное Оборудование Данных), с помощью которого представленный клиентом текст телеграммы вводится в виде исходного сообщения $A(t)$ в АПД (Аппаратуру Приема/Передачи Данных) (см. рис. 3.1).

Назначение АПД состоит в преобразовании текста исходного сообщения $A(t)$ в кодированные сигналы $S(t)$, удобные для передачи по линии связи.

Выполнение указанного преобразования фактически включает две операции:

- кодирование, при котором каждый символ исходного сообщения $A(t)$ превращается в определенное сочетание элементарных дискретных символов (точки и тире телеграфного кода). Цель кодирования, выполняемого с помощью специального устройства – кодера, заключается в преобразовании в соответствии с установленными правилами (протоколами обмена) исходного сообщения $A(t)$ к виду, удобному для передачи, – кодовому сообщению $A_k(t)$;
- передача кодового сообщения $A_k(t)$ в линию связи в виде последовательности кодовых сигналов $S(t)$, в которой каждый символ кодового сообщения $A_k(t)$ превращается в комбинацию элемен-

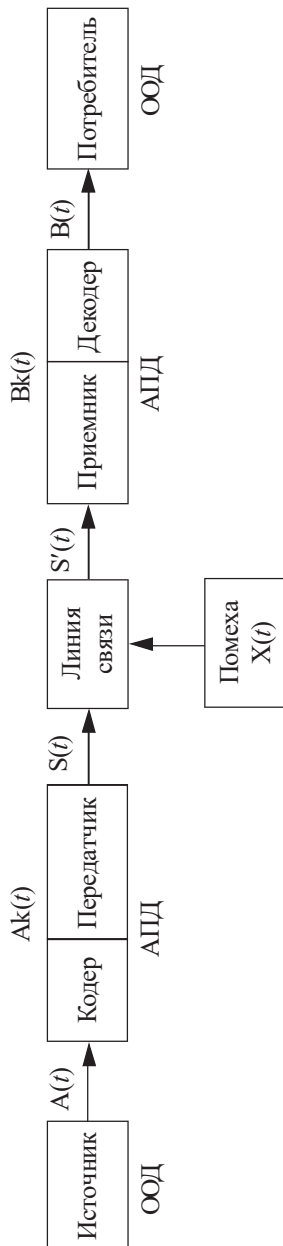


Рис. 3.1. Структура канала передачи информации:

$A(t)$ и $A_k(t)$ – исходное сообщение и результат его кодирования; $S(t)$ – сигнал, удобный для передачи; $S'(t)$ – принимаемый сигнал с примесью помехи $X(t)$; $B_k(t)$ и $B(t)$ – принятое кодовое сообщение и результат декодирования у потребителя; $X(t)$ – помеха в линии связи

тарных сигналов в линии связи (точки и тире телеграфного кода). Передача осуществляется с помощью передатчика, роль которого в нашем случае выполняет телеграфный аппарат.

Переданный в линию связи сигнал $S(t)$ принимается на противоположном конце этой линии приемником (телеграфным аппаратом), входящим в состав АПД потребителя. Для идеальной линии связи принятый сигнал $S'(t)$ должен совпадать с переданным: $S(t) \equiv S'(t)$. Однако, в силу наличия помех в линии связи, которые искажают переданный сигнал, эти два сигнала в общем случае не совпадают между собой: $S(t) \neq S'(t)$. Помехи представляют собой электрические сигналы, обычно присутствующие в линии связи. Это могут быть, например, тепловые электрические шумы, обусловленные тепловым движением носителей заряда в проводниках линии связи, в результате чего на концах любого проводника возникает флуктуирующая разность потенциалов.

Принятый приемником потребителя сигнал $S'(t)$ поступает в декодер, входящий в состав АПД потребителя (см. рис. 3.1). Декодер в соответствии с установленными правилами (протоколами обмена) распознает сочетания принятых элементарных дискретных символов (точки и тире телеграфного кода), преобразует их в символы принятого кодового сообщения $B_k(t)$ и осуществляет декодирование – преобразование $B_k(t)$ в буквы и цифры принятого сообщения $B(t)$. Принятое сообщение $B(t)$, которое в общем случае в силу отличия $S'(t)$ от $S(t)$ не совпадает с переданным $A(t)$, с помощью ООД поступает к потребителю.

Таким образом, в силу наличия помех в реальном канале связи принятое сообщение, вообще говоря, не совпадает с переданным $A(t) \neq B(t)$. Поэтому в качестве одного из основных показателей качества передачи информации вводят [52] понятие о достоверности передачи, характеризующей близость (в идеале идентичность) переданного и принятого сообщений.

Для минимизации различия переданного и принятого сообщений необходимо решить несколько проблем передачи измерительной информации, а именно:

- проблемы выбора и стандартизации сигналов, применяемых для передачи сообщений;

- проблемы кодирования передаваемой информации;
- проблемы стандартизации правил обмена информацией (протоколов обмена).

Рассмотрим эти проблемы подробнее.

3.2. Сигналы электрические непрерывные входные и выходные

Существует два типа систем передачи информации. Они, в общем, похожи и отличаются типом используемого кодера. В частности, рассмотренный выше процесс кодирования характерен для цифровых систем передачи информации, когда передаваемое сообщение представляет собой какой-то текст – набор букв и цифр.

Кроме цифровых существуют и аналоговые системы передачи информации. Главное отличие этих систем от цифровых – процедура кодирования, осуществляемая на физическом уровне, и представляющая собой т. н. модуляцию несущего сигнала.

Простейший пример – телефонная линия связи. В этом случае передаваемое сообщение представляет собой речь абонента на передающем конце телефонной линии, которую нужно передать абоненту на противоположном конце этой линии. Передача информации в данном случае осуществляется с помощью модуляции (изменения амплитуды) постоянного тока, протекающего в цепи, содержащей микрофон передающего телефонного аппарата и телефон принимающего аппарата (см. рис. 3.2).

Микрофон телефонного аппарата представляет собой полость с упругой крышкой, заполненную угольным порошком и включенную в цепь напряжения постоянного тока, формируемого в линии связи электрической батареей телефонной станции (АТС). Когда абонент говорит перед микрофоном, крышка под воздействием звуковых колебаний сжимает угольный порошок микрофона, изменяя таким образом сопротивление микрофона и протекающий через него электрический ток. Таким образом микрофон модулирует ток, преобразуя его в пульсирующий в соответствии с речью абонента ток, протекающий в телефонной линии связи.

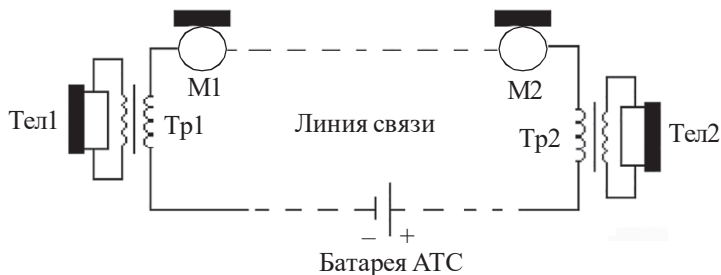


Рис. 3.2. Схематическое изображение телефонной линии связи:

М1, М2 – микрофон абонента 1 и 2 соответственно; Тел1, Тел2 – телефон абонента 1 и 2 соответственно; Tr1, Tr2 – развязывающие трансформаторы

Телефон абонента представляет собой полость с упругой стальной диафрагмой, находящейся в магнитном поле электромагнита, расположенного в этой полости. Пульсирующий в соответствии с речью абонента ток, протекающий в телефонной линии связи, проходит через электромагнит телефона абонента и создает пульсирующее магнитное поле, которое заставляет колебаться упругую диафрагму телефона. Колебания диафрагмы под воздействием этого магнитного поля приводят к возбуждению звуковых колебаний в воздухе, которые воспроизводят речь абонента, произнесенную перед микрофоном. Таким образом осуществляется демодуляция сигнала в телефонной линии связи.

Развязывающие трансформаторы Tr1 и Tr2, представленные на рис. 3.2, предназначены для исключения подмагничивания электромагнитов телефонов абонентов телефонной сети, влияющего на качество воспроизведения речи при телефонном разговоре.

Приведенный выше пример свидетельствует о возможности использования сигналов постоянного тока и напряжения для передачи информации. Нормативные требования к таким сигналам представлены в ГОСТ 26.011 [47]. Этот стандарт устанавливает основные параметры электрических непрерывных входных и выходных сигналов тока и напряжения, предназначенных для информационной связи между средствами измерений и компонентами ИС. В частности, в табл. 3.1 приведены рекомендованные в [47] пределы из-

менения силы тока и напряжения непрерывных сигналов постоянного тока, а также значения входных $R_{\text{вх}}$ и нагрузочных $R_{\text{нагр}}$ сопротивлений, предназначенных для использования в каналах передачи измерительной информации.

Т а б л и ц а 3.1

Номинальные значения параметров сигналов тока и напряжения

Компоненты ИС	Компоненты, не входящие в ИС	$R_{\text{вх}}^*$, Ом, не более	$R_{\text{нагр}}^{**}$, Ом, не менее
<i>Входные и выходные сигналы постоянного тока</i>			
0...5 мА	0...5 мА	500	2 500
–5...+5 мА	–5...+5 мА	500	2 500
0...20 мА	0...20 мА	250	1 000
4...20 мА	4...20 мА	250	1 000
<i>Входные и выходные сигналы постоянного напряжения</i>			
0...5 В	0...5 В	$10 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
1...5 В	1...5 В	$10 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$
–	–5...+5 В	–	$1 \cdot 10^3$
0...10 В	0...10 В	–	$2 \cdot 10^3$
–10...+10 В	–10...+10 В	–	$2 \cdot 10^3$

* Входное сопротивление $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}/I_{\text{вх}}$, где $U_{\text{вх}}$ и $I_{\text{вх}}$ – соответственно напряжение и ток на входе СИ.

** Нагрузочное сопротивление $R_{\text{нагр}} = U_{\text{нагр}}/I_{\text{нагр}}$, где $U_{\text{нагр}}$ и $I_{\text{нагр}}$ – соответственно напряжение и ток на нагрузке СИ.

Разность между наибольшим и наименьшим мгновенными значениями (пульсации) сигнала постоянного тока и напряжения должна быть не более 0,1; 0,25 или 0,6 % верхнего предела изменения выходного сигнала прибора и должна устанавливаться в ТУ на конкретные СИ.

Главным достоинством использования сигналов постоянного тока и напряжения для передачи измерительной информации является простота реализации соответствующих устройств, а главным недостатком – ограничение минимального значения относительной погрешности СИ нормированным значением пульсации сигнала.

Отмеченный недостаток не возникает при использовании частотных сигналов по ГОСТ 26.010 [48]. Стандарт устанавливает основные параметры входных и выходных частотных электрических непрерывных сигналов, для которых частота синусоидального или несинусоидального напряжения (тока) однозначно соответствует значениям непрерывной измеряемой величины, которую они представляют. Кроме того, стандарт устанавливает требования к параметрам входных и выходных цепей СИ и компонентов ИС, использующих такие сигналы.

ГОСТ 26.010 вводит в рассмотрение сигналы, которые характеризуются информативными и неинформативными параметрами. Согласно ГОСТ 8.009 [14] информативный параметр сигнала функционально связан с измеряемой величиной и используется для передачи ее значения. Неинформативным является параметр сигнала, который не используется для передачи значения измеряемой величины. В частности, в рамках стандарта [48] частота является информативным параметром сигнала, а все остальные параметры, например, амплитуда или форма сигнала – неинформативными. Такое разделение повышает помехоустойчивость передаваемого сигнала.

Требования к информативному параметру частотного сигнала по ГОСТ 26.010

Зависимость $f(X)$ частоты сигнала f от текущего значения измеряемой величины X для частотного сигнала выражается формулой

$$f(X) = f_{\min} + (X - X_{\min}) \frac{f_{\max} - f_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}},$$

где f_{\min} – минимальное значение частоты, соответствующее нижнему предельному значению измеряемой величины X_{\min} ; f_{\max} – мак-

симальное значение частоты, соответствующее верхнему предельному значению измеряемой величины X_{\max} .

График зависимости частоты выходного сигнала f от значения измеряемой величины X представлен на рис. 3.3. Как видно из рисунка, этот график представляет собой прямую линию, проходящую через точки с координатами (f_{\min}, X_{\min}) и (f_{\max}, X_{\max}) .

Минимальное значение частоты f_{\min} и диапазон изменения частоты $\Delta f = (f_{\max} - f_{\min})$ для частотного сигнала, рекомендованные в [48], представлены в табл. 3.2.

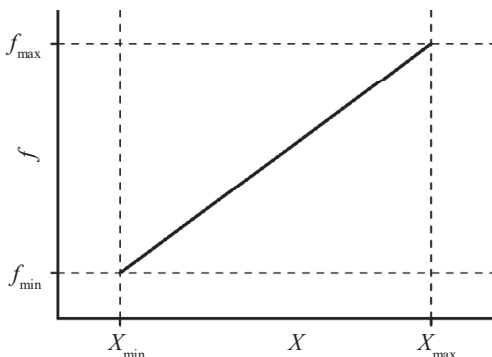


Рис. 3.3. Зависимость частоты выходного сигнала от значения измеряемой величины

Фазовую нестабильность частотного сигнала ΔT , определяемую как отклонение действительного значения периода $T_{\text{дейст}}$ при неизменном значении преобразуемой величины от его расчетного значения $T = 1/f$, согласно [48] следует выбирать из ряда

$$\Delta T = |T_{\text{дейст}} - T| = (1, 2, 5) \cdot 10^{-k} \cdot T,$$

где $k = 2$ или 3 .

Требования к неинформативным параметрам частотного сигнала по ГОСТ 26.010

Выходные сигналы. Амплитуда выходных сигналов синусоидальной формы должна быть от 1,0 до 1,6 В. Для выходных сигналов синусоидальной формы максимально допускаемое отношение высших гармонических составляющих напряжения к напряжению

Т а б л и ц а 3.2

Номинальные значения параметров частотных сигналов

f_{\min} , Гц	0	4	8	16	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Δf , Гц	4	4	4	4	—	—	—	—	—	—
	8	8	8	8	—	—	—	—	—	—
	16	16	16	—	—	—	—	—	—	—
	250	—	—	—	250	—	250	250	—	—
	500	—	—	—	—	500	500	500	500	—
	1 000	—	—	—	—	—	1 000	1 000	1 000	—
	2 000	—	—	—	—	—	—	2 000	2 000	—
	4 000	—	—	—	—	—	—	—	4 000	—
	8 000	—	—	—	—	—	—	—	—	8 000

основной гармонике в установившемся режиме следует выбирать из ряда 2, 5, 10 %.

Уровни выходных сигналов несинусоидальной формы должны соответствовать значениям, представленным в первых двух строках табл. 3.3.

Номинальные значения активного сопротивления нагрузки выбирают из ряда: 75, 150, 300, 600, 1 400 и 6 000 Ом.

Низкое сопротивление для выходных сигналов, формируемых периодическим изменением электрического сопротивления выходной цепи, должно быть не более 200 Ом, высокое сопротивление — не менее 50 кОм.

Входные сигналы. Амплитуда входных сигналов синусоидальной формы должна находиться в одном из следующих диапазонов: (40–160) мВ; (160–600) мВ; (0,6–2,4) В. При этом входные сигналы с амплитудой менее 25 % от нижнего предела диапазона измерений не должны восприниматься приемными устройствами.

Уровни входных сигналов несинусоидальной формы должны соответствовать значениям, представленным в двух последних строках табл. 3.3.

Уровни сигналов несинусоидальной формы

<i>Уровни выходных сигналов несинусоидальной формы</i>					
Высокий уровень	2,4÷5,25 В	1,0÷1,6 В	8÷12 мА	16÷24 мА	40÷60 мА
Низкий уровень	0÷0,4 В	–1,6÷0 В	0÷0,5 мА	0÷1 мА	0÷2,5 мА
<i>Уровни входных сигналов несинусоидальной формы</i>					
Высокий уровень	2,0÷5,25 В	0,6÷2,4 В	6÷12 мА	12÷24 мА	32÷60 мА
Низкий уровень	–0,4÷0,8 В	–2,4÷0,15 В	0÷0,5 мА	0÷1 мА	0÷2,5 мА

Для входных сигналов, формируемых периодическим изменением электрического сопротивления входной цепи, средство измерений должно воспринимать как сигнал низкого уровня подключенную к входу цепь с активным сопротивлением 1 кОм и менее и как сигнал высокого уровня – цепь с активным сопротивлением 10 кОм и более.

Главный недостаток частотных сигналов – нестабильность частоты сигнала, которая влияет на погрешность прибора. Отмеченный недостаток не возникает при использовании сигналов с дискретным изменением параметров, к рассмотрению которых переходим.

3.3. Сигналы электрические с дискретным изменением параметров

Такие сигналы используются в цифровых системах передачи и обеспечивают максимальную достоверность передачи измерительной информации. В ГОСТ 26.013 [49] установлены требования к значениям параметров электрических входных и выходных сигналов тока и напряжения с дискретно изменяющимися амплитудой,

длительностью, фазой и частотой, которые предназначены для информационной связи средств измерений и компонентов ИС между собой. В частности, основные характеристики сигнала с дискретным изменением амплитуды (т. н. двоичный сигнал) представлены на рис. 3.4.

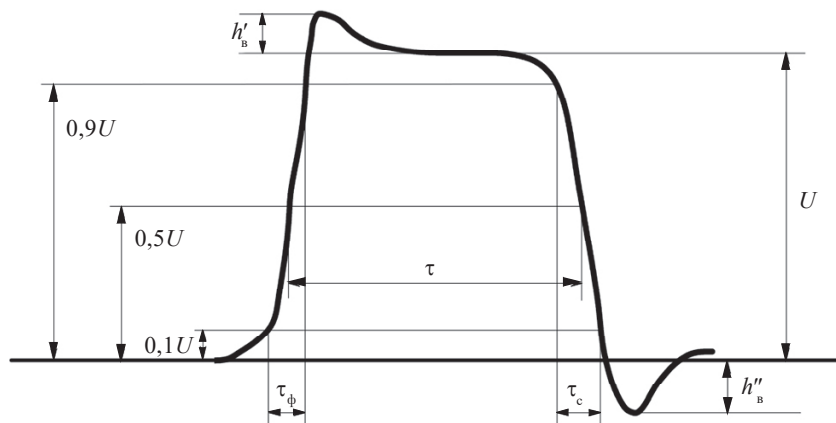


Рис. 3.4. Основные характеристики сигнала:

U — амплитуда сигнала; $h'_в$ и $h''_в$ — выбросы на вершине и в паузе; τ — активная длительность сигнала; $\tau_ф$ и $\tau_с$ — активная длительность фронта и среза

Номинальные значения (абсолютные) амплитуд (верхних уровней) U двоичных сигналов следует выбирать по ГОСТ 26.013 из рядов значений: 2,4; 6,0; 12,0; 24,0; 48,0; 60,0; 110,0; 220,0 В — для напряжений; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500; 1 000; 2 000 мА — для токов.

Пределы допускаемых относительных отклонений амплитуд сигнала U от номинального значения, а также значений амплитуды остаточного напряжения, нормированного на номинальное значение, следует выбирать из рядов значений: 5; 10 % — для выходных сигналов; 10; 20; 30 % — для входных сигналов.

Пределы допускаемых выбросов $h'_в$ и $h''_в$ на вершине и в паузе двоичного сигнала следует выбирать из ряда 5; 10; 20 % значения амплитуды сигнала.

Диапазоны напряжений, соответствующих высокому и низкому уровням сигналов, формируемых или воспринимаемых средствами измерений и компонентами ИС, имеющими на входе или выходе интегральные микросхемы, должны соответствовать табл. 3.4.

Т а б л и ц а 3.4

Уровни сигналов интегральных микросхем

Вид сигнала	Диапазон напряжений, В	
	Высокий уровень	Низкий уровень
Выходной	2,40–5,25	0,00–0,50
Входной	2,00–5,25	–0,40–0,80
Выходной	7,70–9,45	0,00–0,50
Входной	7,00–9,45	–0,20–1,40
Выходной	12,00–16,50	0,00–1,50
Входной	7,50–16,50	0,00–6,50

Номинальные значения активных длительностей импульсов и промежутков времени между импульсами, используемых в качестве параметров для передачи информации, следует выбирать из ряда: $(1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3) \cdot 10^N$, где N – любое целое положительное число, нуль или целое отрицательное число не менее минус 7.

Активная длительность фронта τ_f или среза τ_c импульсов не должна превышать 20 % длительности импульса τ . Пределы допускаемых отклонений длительностей импульсов τ не должны превышать 15 % номинального значения и должны устанавливаться в технических условиях на конкретное СИ.

Основное преимущество сигналов с дискретным изменением параметров – высокая помехоустойчивость, т. е. малое влияние помех, всегда присутствующих в линии, на передаваемую с помощью таких сигналов информацию. Иначе говоря, использование сигналов с дискретным изменением параметров позволяет перейти при приеме сигнала от измерения параметров сигнала (амплитуда, частота)

к метрологическому контролю сигнала (есть или нет) в линии. Вследствие этого резко возрастает помехоустойчивость приема, поэтому иногда говорят об отсутствии погрешности (искажения принимаемых данных) при использовании подобных сигналов. Покажем, однако, что это не так, на примере двоичного сигнала с дискретным изменением амплитуды.

3.4. Пороговый приемник дискретных сигналов

Рассмотрим ситуацию, характерную для современных ИС учета электрической энергии. На входе ИК системы стоит счетчик электрической энергии. Обороты диска счетчика с помощью встраиваемого УФИ (устройства формирования импульсов) преобразуются в импульсы тока во внешней цепи – на каждый оборот диска счетчика УФИ формирует один или несколько импульсов тока. Формируемые с помощью УФИ импульсы регистрируются УСПД (устройством сбора и передачи данных) системы, которое подсчитывает количество импульсов, поступивших от каждого счетчика, и передает полученное значение в ПЭВМ системы. В качестве приемника измерительной информации в УСПД обычно выступает пороговый приемник дискретных сигналов [52].

Пороговый приемник дискретных сигналов представляет собой простейший приемник электрических сигналов, который в некоторый момент времени измеряет напряжение на входе приемника. Считается, что время измерения пренебрежимо мало по сравнению с длительностью измеряемого импульса. Если в момент измерения напряжение на входе U_x превосходит значение порога $U_{\text{пор}}$ ($U_x > U_{\text{пор}}$), то приемник формирует сигнал приема импульса, в противном случае при $U_x < U_{\text{пор}}$ приемник формирует сигнал отсутствия импульса.

Прием импульсных сигналов затрудняется из-за наличия помех в линии связи, которые бывают двух типов:

- импульсные помехи, представляющие собой последовательность импульсов произвольной формы со случайными амплитудами, длительностью и моментом возникновения;

- флуктуационные помехи, представляющие собой наложение большого числа импульсных помех, вследствие чего зависимость напряжения помех от времени является непрерывной случайной величиной. К флуктуационным помехам примыкают помехи промышленной частоты и ее гармоник – наводки на линии связи, формируемые сетями электроснабжения потребителей.

Для рассмотрения работы порогового приемника необходимо определить характер помех. В дальнейшем, для определенности, будем полагать, что мы имеем дело с флуктуационными помехами типа «белого шума», которые характеризуются практически неограниченным спектром частот и нормальным (гауссовым) распределением мгновенных значений амплитуд напряжения помехи $U_{\text{п}}$. Дифференциальная функция распределения (плотность распределения) таких помех $f(U_{\text{п}})$ имеет вид:

$$f(U_{\text{п}}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{U_{\text{п}}^2}{2\sigma^2}\right), \quad (3.1)$$

где σ – среднеквадратичное значение напряжения помехи.

Как видно из (3.1), дифференциальная функция распределения $f(U_{\text{п}})$ – величина размерная. Безразмерной величиной является интегральная функция нормального распределения $F(U_{\text{п}})$ – вероятность того, что значение амплитуды помехи $U_{\text{п}}$ не превышает заданного значения U_0 :

$$F(U_{\text{п}}) \equiv P\{U_{\text{п}} \leq U_0\} = \int_{-\infty}^{U_0} f(U_{\text{п}}) dU_{\text{п}}. \quad (3.2)$$

В общем случае интегралы от функции $f(U_{\text{п}})$ вычисляют численно. В [53] предложен оригинальный способ аналитического вычисления таких интегралов. Рассмотрим характеристики нормального распределения белого шума с использованием указанного способа.

Интеграл нормировки

Вероятность произвольного значения амплитуды помехи, т. е. $(U_{\text{п}} \leq \infty)$, равна, очевидно, единице. Это значит, что интеграл (3.2) при указанном условии должен равняться единице. Проверим это утверждение путем прямого вычисления интеграла в (3.2):

$$F(U_{\Pi} \leq \infty) \equiv I = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{U_{\Pi}^2}{2\sigma^2}\right) dU_{\Pi}.$$

Умножим интеграл I сам на себя. При этом в первом интеграле вводим замену $U_{\Pi} = x$, а во втором – замену $U_{\Pi} = y$. В результате получим:

$$I^2 = \int_{-\infty}^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} dy \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right). \quad (3.3)$$

Переходим в двойном интеграле (3.3) от декартовых координат (x, y) к цилиндрическим координатам (r, φ) с помощью соотношений:

$$x = r \cos \varphi, y = r \sin \varphi, r^2 = x^2 + y^2, dx dy = r dr d\varphi, \quad (3.4)$$

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi, 0 \leq r \leq \infty.$$

Тогда двойной интеграл (3.3) может быть записан в виде

$$I^2 = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\infty} \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) r dr = \int_0^{\infty} \exp(-z) dz = 1, \quad (3.5)$$

где $z = \frac{r^2}{2\sigma^2}, dz = \frac{r dr}{\sigma^2}.$

Интеграл в (3.5) равен 1, т. е. $I = 1$, что и требовалось доказать. Дифференциальная функция распределения белого шума (3.1) нормирована на единицу.

Среднее значение напряжения шума

Это значение определяется интегралом

$$\bar{U}_{\Pi} \equiv I_1 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_{\Pi}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{U_{\Pi}^2}{2\sigma^2}\right) dU_{\Pi},$$

который равняется нулю ($\bar{U}_{\Pi} = 0$), поскольку под интегралом стоит нечетная функция.

Среднеквадратичное значение напряжения шума

В соответствии с определением среднеквадратичное значение напряжения шума $U_{\text{СКВ}}$ определяется из соотношения

$$U_{\text{СКВ}}^2 \equiv I_2 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_{\text{п}}^2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{U_{\text{п}}^2}{2\sigma^2}\right) \partial U_{\text{п}}.$$

Умножаем интеграл I_2 сам на себя и вводим замену, использованную при выводе (3.3). В результате получим:

$$I_2^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \partial x \int_{-\infty}^{\infty} \partial y \frac{x^2 y^2}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right).$$

Снова переходим к цилиндрическим координатам согласно (3.4) в полученном интеграле. В результате получим:

$$I_2^2 = \int_0^{2\pi} \partial \varphi \int_0^{\infty} \frac{r^4 \sin^2 \varphi \cdot \cos^2 \varphi}{2\pi\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) r \partial r. \quad (3.6)$$

Интеграл по φ в (3.6) легко вычисляется. Действительно:

$$\int_0^{2\pi} (\sin \varphi \cdot \cos \varphi)^2 \partial \varphi = \int_0^{2\pi} \frac{\sin^2 2\varphi}{4} \partial \varphi = \frac{1}{8} \int_0^{2\pi} (1 - \cos 4\varphi) \partial \varphi = \frac{\pi}{4}.$$

В таком случае интеграл (3.6) принимает вид:

$$I_2^2 = \int_0^{\infty} \frac{r^4}{8} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \frac{r \partial r}{\sigma^2} = \frac{\sigma^4}{2} \int_0^{\infty} z^2 \cdot \exp(-z) \partial z, \quad (3.7)$$

где $z = \frac{r^2}{2\sigma^2}$, $\partial z = \frac{r \partial r}{\sigma^2}$.

Интеграл в (3.7) вычисляется по частям:

$$\int U \partial V = UV - \int V \partial U.$$

Пусть $U = z^2$, а $\partial V = \exp(-z)$, тогда $\partial U = 2z$, $V = -\exp(-z)$, и из (3.7) получим:

$$\int_0^{\infty} z^2 \cdot \exp(-z) \partial z = [z^2 \cdot (-\exp(-z))] \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} 2z \cdot \exp(-z) \partial z.$$

Интегрируя последний интеграл снова по частям, получим:

$$U = 2z, \text{ а } \partial V = \exp(-z), \text{ тогда } \partial U = 2\partial z, V = -\exp(-z),$$

тогда

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} 2z \cdot \exp(-z) \partial z &= [2z(-\exp(-z))] \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} 2 \exp(-z) \partial z = \\ &= 2 \exp(-z) \Big|_0^{\infty} = 2. \end{aligned}$$

В таком случае интеграл (3.7) имеет значение:

$$I_2^2 = (U_{\text{СКВ}}^2)^2 = \frac{\sigma^4}{2} \cdot 2 = \sigma^4 \text{ или } U_{\text{СКВ}} = \sigma.$$

Иначе говоря, значение σ , входящее в формулу (3.1), определяет, как и утверждалось выше, среднеквадратичное значение напряжения белого шума $U_{\text{СКВ}}$.

Зная функцию распределения помех (3.1), нетрудно определить вероятности появления ошибок первого и второго рода при приеме зашумленного сигнала для рассматриваемого порогового приемника, т. е. вероятности ошибочного приема логической единицы $P(0 \rightarrow 1)$ при передаче логического нуля и ошибочного приема логического нуля $P(1 \rightarrow 0)$ при передаче логической единицы. Обозначим порог срабатывания порогового приемника через $U_{\text{пор}}$.

Подсчитаем вероятность $P(0 \rightarrow 1)$ того, что помеха в момент приема окажется больше значения порога, т. е. приемник в отсутствие сигнала примет помеху за сигнал.

Схематически ситуацию вычисления указанной вероятности можно представить согласно рис. 3.5.

Математически решаемая задача имеет вид:

$$P(U_{\text{п}} \geq U_{\text{пор}}) \equiv P(0 \rightarrow 1) = \int_{U_{\text{пор}}}^{\infty} f(U_{\text{п}}) \partial U_{\text{п}},$$

где $f(U_{\text{п}})$ – дифференциальная функция нормального распределения, представленная в (3.1).

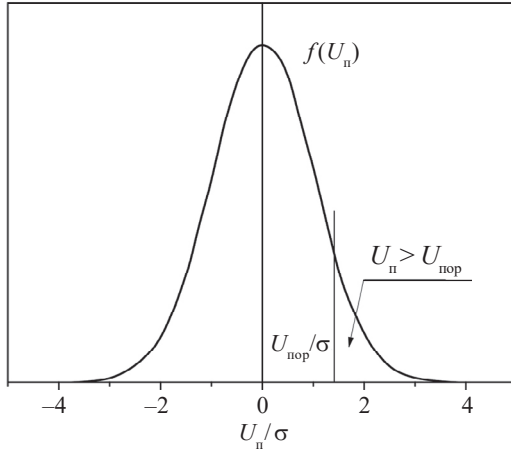


Рис. 3.5. Схема определения вероятности $P(0 \rightarrow 1)$

Если в приведенном выше интеграле провести замену $U_{\text{п}} \rightarrow -U_{\text{п}}$ и поменять местами пределы интегрирования, то выражение для определения вероятности $P(0 \rightarrow 1)$ может быть записано в виде

$$P(0 \rightarrow 1) = \int_{-\infty}^{-U_{\text{п}_\text{пор}}} f(U_{\text{п}}) dU_{\text{п}} = F(-U_{\text{п}_\text{пор}}).$$

Здесь $F(-U_{\text{п}_\text{пор}})$ – определенная в (3.2) интегральная функция нормального распределения аргумента $U_{\text{п}} = -U_{\text{п}_\text{пор}}$, которая может быть записана в виде

$$P(0 \rightarrow 1) = \int_{-\infty}^{-U_{\text{п}_\text{пор}}} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{U_{\text{п}}^2}{2\sigma^2}\right) dU_{\text{п}} = \Phi(-\beta),$$

где $\Phi(-\beta)$ – нормированная интегральная функция нормального распределения аргумента $-\beta$, определяемая соотношением

$$\Phi(-\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\beta} \exp\left(-\frac{X^2}{2}\right) dX, \quad (3.8)$$

где $X = \frac{U_{\text{п}}}{\sigma}$ – относительная амплитуда помехи; $\beta = \frac{U_{\text{п}_\text{пор}}}{\sigma}$ – отношение порога срабатывания приемника к среднеквадратическому значению шума.

Аналогичным образом можно оценить вероятность $P(1 \rightarrow 0)$ того, что при наличии сигнала амплитудой U_m из-за влияния помехи величиной U_n приемник примет решение об отсутствии сигнала: $U_n < U_{\text{пор}}$ (см. рис. 3.6). Дифференциальная функция распределения помехи в этом случае имеет вид:

$$f'(U_n) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(U_n - U_m)^2}{2\sigma^2}\right) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(X - \alpha)^2}{2}\right), \quad (3.9)$$

где $X = \frac{U_n}{\sigma}$, а $\alpha = \frac{U_m}{\sigma}$ – т. н. отношение сигнал/шум (см. ГОСТ 26.205 [54]).

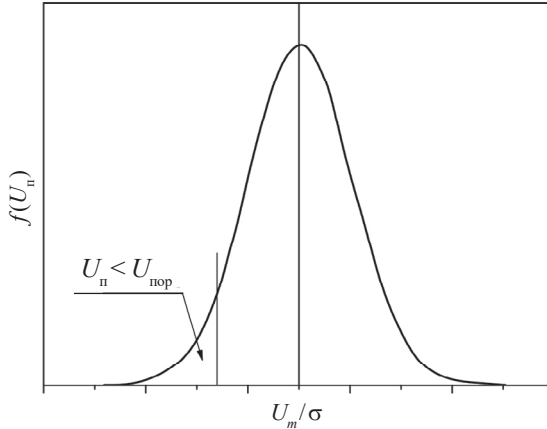


Рис. 3.6. Схема определения вероятности $P(1 \rightarrow 0)$

Согласно рис. 3.6 вероятность $P(1 \rightarrow 0)$ может быть определена из соотношения

$$P(U_n \leq U_{\text{пор}}) \equiv P(1 \rightarrow 0) = \int_{-\infty}^{U_{\text{пор}}} f'(U_n) dU_n.$$

С учетом (3.9) последний интеграл может быть записан в виде

$$P(1 \rightarrow 0) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{U_{\text{пор}}} \exp\left(-\frac{(X - \alpha)^2}{2}\right) \partial U_{\text{п}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta - \alpha} \exp\left(-\frac{Y^2}{2}\right) \partial Y,$$

где $Y = X - \alpha$, $\beta = \frac{U_{\text{пор}}}{\sigma}$.

Учитывая формулу (3.8), из последнего соотношения получаем:

$$P(1 \rightarrow 0) = \Phi(\beta - \alpha).$$

Оба приведенных выше интеграла $\Phi(-\beta)$ и $\Phi(\beta - \alpha)$ часто используются в научной литературе и протабулированы в зависимости от значений аргумента. Физический смысл этих интегралов – вероятности искажения принимаемой информации. На рис. 3.7 представлены зависимости вероятностей $P(0 \rightarrow 1)$ и $P(1 \rightarrow 0)$ от относительного значения величины порога срабатывания приемника $\beta/\alpha = U_{\text{пор}}/U_m$, рассчитанные для трех значений отношения сигнал/шум: $\alpha = U_m/\sigma = 2, 4$ и 6 .

Как видно из рис. 3.7, обе эти вероятности монотонно убывают с ростом отношения сигнал/шум α . Вместе с тем вероятности $P(0 \rightarrow 1)$ и $P(1 \rightarrow 0)$ по-разному ведут себя с изменением относительного значения величины порога срабатывания приемника $\beta/\alpha = U_{\text{пор}}/U_m$. С ростом значения β/α вероятность $P(0 \rightarrow 1)$ убывает, но одновременно растет вероятность $P(1 \rightarrow 0)$. Иначе говоря, нельзя одновременно уменьшить обе эти вероятности за счет выбора значения отношения β/α .

Поскольку при передаче сигнала одинаково неприемлемы искажения обоих типов $P(0 \rightarrow 1)$ и $P(1 \rightarrow 0)$, то для характеристики искажений в линии связи вводят понятие о вероятности искажения элементарного сигнала (бита) p , которую определяют с помощью соотношения

$$p \equiv p(\alpha, \beta) = P(0) \cdot P(0 \rightarrow 1) + P(1) \cdot P(1 \rightarrow 0), \quad (3.10)$$

где $P(0)$ и $P(1)$ – вероятности передачи в линии связи сигнала, соответствующего логическому нулю и логической единице соот-

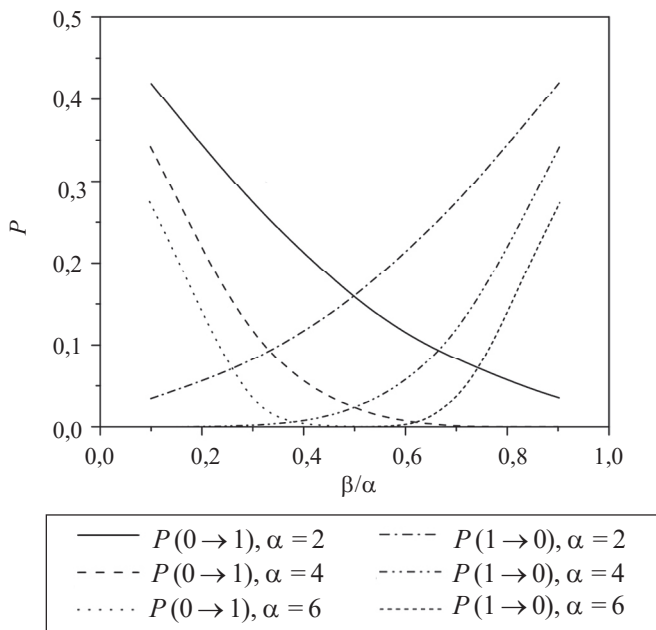


Рис. 3.7. Зависимость вероятностей $P(0 \rightarrow 1)$ и $P(1 \rightarrow 0)$ от $\beta/\alpha = U_{\text{пор}} / U_m$

ответственно. Полагая, что в линии связи появление таких сигналов равновероятно: $P(0) = P(1) = 0,5$, из (3.10) получим:

$$p = 0,5 \cdot [P(0 \rightarrow 1) + P(1 \rightarrow 0)] = 0,5 \cdot [\Phi(-\beta) + \Phi(\beta - \alpha)].$$

Исходя из этого соотношения, легко рассчитать зависимость $p(\alpha, \beta)$. В частности, в табл. 3.5 представлены значения $p(\alpha, \beta)$, рассчитанные для разных значений отношения $\beta/\alpha = U_{\text{пор}} / U_m$ и значений α , заданных в диапазоне от 1 до 8.

Как видно из табл. 3.5, минимальное значение p имеет место в т. н. симметричном двоичном канале, для которого $\beta/\alpha = 0,5$ или $U_{\text{пор}} = U_m / 2$, т. е. порог срабатывания приемника $U_{\text{пор}}$ равен половине амплитуды сигнала U_m . В частности, для $\alpha = 7$ значение $p \approx 10^{-4}$. Именно это значение вероятности искажения элементарного сигнала (бита) p приводится в качестве допустимого для канала связи в ГОСТ 26.205 [54].

Таблица значений вероятности p (α , β)

$\alpha = U_m / \sigma$	$\beta/\alpha = 0,1$	0,3	0,5	0,7	0,9
1	0,32212	0,31203	0,30854	0,31203	0,32212
2	0,22834	0,17751	0,15866	0,17751	0,22834
3	0,19278	0,10096	0,06681	0,10096	0,19278
4	0,17237	0,05881	0,02275	0,05881	0,17237
5	0,15427	0,03352	0,00621	0,03352	0,15427
6	0,13713	0,01797	0,00135	0,01797	0,13713
7	0,12098	0,00893	0,00023	0,00893	0,12098
8	0,10593	0,00410	0,00003	0,00410	0,10593

Следует заметить, что, несмотря на кажущуюся простоту, пороговый приемник играет большую роль на практике. Входные цепи устройств сбора и передачи данных (УСПД) измерительных систем выполнены обычно в виде порогового приемника, построенного на базе оптрона. Оптодрон представляет собой электронный прибор, состоящий из излучателя света (светодиод) и фотоприемника (фототранзистор, фоторезистор и т. п.). Структурная схема популярного транзисторного интегрального оптрона типа РС817С представлена на рис. 3.8.

Принцип работы оптрона заключается в следующем. При протекании достаточно большого тока через светодиод А излучаемый им световой поток оказывается достаточным для того, чтобы открыть фототранзистор Б (эффект порога). Электрическая схема, принимающая сигнал с фототранзистора, регистрирует момент открывания фототранзистора и принимает решение о наличии сигнала (при открытом фототранзисторе) или отсутствии сигнала (при закрытом фототранзисторе).

Настройка входных каналов УСПД, построенных на базе оптронов, на режим симметричного двоичного канала осуществляется при выпуске УСПД из производства и сводится к регулировке тока

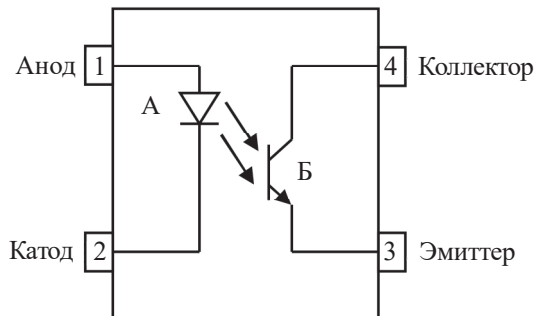


Рис. 3.8. Структурная схема оптрона:

А – светодиод; Б – фототранзистор

срабатывания, протекающего через светодиод каждого оптрона прибора.

Для повышения помехоустойчивости порогового приемника обычно используются методы программной защиты от помех. Основной принцип защиты – получение нескольких опросов сигнала на входе приемника за время, равное длительности сигнала, и программная обработка полученных результатов. Если большинство опросов за время, равное длительности сигнала, показывает наличие сигнала, принимается решение о наличии сигнала на входе приемника. Если нет – принимается решение об отсутствии сигнала на входе приемника.

Глава 4

СТАНДАРТИЗАЦИЯ ПРОТОКОЛОВ ОБМЕНА

В главе 3 рассматривались вопросы выбора и стандартизации сигналов, применяемых для передачи измерительной информации. Проблемы стандартизации протоколов обмена и кодирования передаваемой информации, упоминавшиеся там же, рассмотрим ниже.

4.1. Информационные характеристики дискретного сообщения

Измерительная информация в каналах связи измерительных систем передается с помощью дискретных сообщений, представляющих собой последовательность символов используемого алфавита. К информационным характеристикам сообщения обычно относят количество информации в передаваемом сообщении, скорость передачи информации и т. п.

Оценим в соответствии с [46] количество информации в отдельном дискретном сообщении, которое содержит n символов. Обозначим через m объем алфавита источника рассматриваемого дискретного сообщения. Тогда общее число возможных дискретных сообщений N_n длиной n символов равно $N_n = m^n$.

Действительно, для одного символа ($n = 1$) число возможных сообщений равно объему алфавита m , для двух символов – m^2 , а для n символов – m^n .

Общее число возможных сообщений N_n или любая монотонная функция N_n может служить мерой количества информации, соответствующей отдельному сообщению. Поскольку использовать для этой цели само число N_n неудобно из-за степенной зависимости N_n от n , Р. Хартли (США) предложил в 1928 г. логарифмическую меру количества информации:

$$I_n = \log_k N_n = n \cdot \log_k m. \quad (4.1)$$

Если считать, что вероятности появления символов используемого алфавита одинаковы, то количество информации I_1 , переносимое одним символом ($n = 1$) в соответствии с (4.1), равно:

$$I_1 = \log_k m = -\log_k p, \quad (4.2)$$

где $p = 1/m$ – вероятность появления любого из m символов алфавита.

Выбор основания логарифма k в (4.1) и (4.2) определяет единицу измерения количества информации. В частности, из (4.2) вытекает, что при $k = 2$, объеме алфавита $m = 2$ (двоичная система счисления) и равных вероятностях появления символов алфавита $p = 1/2$ количество информации, переносимое одним символом, равно $I_1 = \log_2 2 = -\log_2 (1/2) = 1$.

Полученную таким образом единицу измерения количества информации Клод Шеннон (США) предложил назвать битом (англ. *binary digits – bits* – двоичные цифры). Согласно Шеннону один бит – это количество информации, которое переносит один символ дискретного сообщения в том случае, когда алфавит сообщения включает только два символа ($m = 2$), вероятности появления которых равны между собой.

В ГОСТ 8.417 [6] бит определен короче: один бит – это единица количества информации в двоичной системе счисления (двоичная единица информации).

При $k = 2$ формула Хартли (4.1) для определения количества информации принимает вид:

$$I_n = \log_2 N_n = n \cdot \log_2 m. \quad (4.3)$$

Следует заметить, что бит – слишком мелкая единица измерения количества информации. На практике чаще применяется более крупная единица – байт, равная восьми битам. Широко используются также еще более крупные производные единицы количества информации:

- 1 килобайт (кбайт) = 1 024 байт $\approx 2^{10}$ байт;
- 1 Мегабайт (Мбайт) = 1 024 кбайт $\approx 2^{20}$ байт;
- 1 Гигабайт (Гбайт) = 1 024 Мбайт $\approx 2^{30}$ байт.

Формула (4.3) не отражает случайного характера появления символов алфавита в рассматриваемом сообщении. В реальных условиях символы используемого алфавита a_j , где $j = 1, 2, \dots, m$, имеют, вообще говоря, разную вероятность появления $p(a_j)$.

Количество информации, которое переносит при этом один символ, равняется согласно (4.2) $I_1 = -\log_2 p(a_j)$. Среднее количество информации H , бит/симв., которое приходится на один символ передаваемого сообщения, можно получить, применив к (4.2) операцию усреднения по всему объему используемого алфавита:

$$H = - \sum_{j=1}^m p(a_j) \cdot \log_2 p(a_j). \quad (4.4)$$

Выражение (4.4) известно как формула Шеннона для среднего количества информации, приходящегося на один символ передаваемого сообщения [46].

Функция H в (4.4) обладает следующими свойствами:

- для дискретных сообщений функция H – величина вещественная, ограниченная и положительная;
- она равна нулю, если с вероятностью единица в сообщении передается один и тот же символ;
- она максимальна, если все символы используемого алфавита появляются в сообщении с одинаковой вероятностью ($p(a_j) = p = \text{const}$):

$$H_{\max} = - \sum_{j=1}^m p \cdot \log_2 p = -mp \cdot \log_2 p = -\log_2 \left(\frac{1}{m} \right) = \log_2 m. \quad (4.5)$$

Как видно из сравнения (4.3) и (4.5), предложенный Шенноном способ измерения среднего количества информации, приходящейся на один символ передаваемого сообщения, является обобщением способа Хартли на случай неравновероятных символов используемого алфавита.

Приведем **пример** расчета количества информации.

Пусть при бросании несимметричной четырехгранной пирамидки вероятности отдельных событий будут равны:

$$p_1 = 1/2, \quad p_2 = 1/4, \quad p_3 = 1/8, \quad p_4 = 1/8.$$

Тогда среднее количество информации, которое мы получим после реализации одного из них, можно рассчитать по формуле (4.4):

$$H = - (1/2 \log_2 1/2 + 1/4 \log_2 1/4 + 1/8 \log_2 1/8 + 1/8 \log_2 1/8) = \\ = 1/2 + 2/4 + 3/8 + 3/8 = 7/4 = 1,75 \text{ бита.}$$

При бросании симметричной и однородной четырехгранной пирамидки, когда $m = 4$, $p_j = 1/4$, из (4.5) получаем:

$$H = \log_2 4 = 2 \text{ бита.}$$

Таким образом, в случае равновероятных событий мы получаем в соответствии с (4.5) большее количество информации, чем в случае неравновероятных событий.

Для характеристики производительности источника дискретных сообщений вводят понятие о производительности источника V , которая определяет среднее количество информации, выдаваемой источником в единицу времени, с помощью соотношения

$$V = H/t, \text{ бит/с,}$$

где H , t – соответственно среднее количество информации, бит, выдаваемой источником, за время t , с.

Для каналов передачи информации вводят аналогичную характеристику – скорость передачи информации по каналу (среднее количество информации, которое можно передать по каналу в единицу времени):

$$R = W \cdot H, \text{ бит/с,}$$

где W – скорость передачи электрических кодовых сигналов; H – среднее количество информации, которое несет один кодовый сигнал.

Приведенные выше характеристики могут быть использованы для оптимизации параметров различных источников сообщений и протоколов передачи данных при проектировании и создании перспективных измерительных систем.

Теория информации очень молодая наука. В ее основе работы российского ученого Владимира Котельникова по оптимальным методам приема сигналов на фоне помех и работы Клода Шеннона (США) по обоснованию методов измерения количества инфор-

мации и оценкам вероятности появления ошибок в передаваемых сообщениях.

В метрологии информационный подход к оценке погрешности измерений находит свое применение. С особенностями такого подхода можно познакомиться по книге Н. В. Новицкого [55].

4.2. Базовая эталонная модель взаимосвязи открытых систем

Основной задачей, решаемой при создании измерительной системы, является оптимальный выбор компонентов, совместимых по электрическим, механическим и информационным характеристикам, что позволяет минимизировать работы по созданию, настройке и эксплуатации системы. Решение этой задачи в части информационной совместимости, к которой относится, в частности, выбор используемого программного обеспечения и протоколов обмена информацией, основано на т. н. модели ВОС (модель взаимосвязи открытых систем), которую предлагают соответствующие международные документы.

Понятие «открытости» систем в модели ВОС обозначает взаимное признание и поддержку соответствующих протоколов обмена, которые регламентируют обмен информацией между системами и их компонентами.

Хорошим примером открытой системы является современная ПЭВМ. Огромное число производителей в разных странах изготавливают множество аппаратных и программных компонентов, которые можно без особых проблем собрать в единую ПЭВМ, заменить один компонент на другой, нарастить до необходимых пределов функциональные возможности.

Основным документом в области стандартизации протоколов обмена информацией является ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1 [56], который идентичен соответствующему международному стандарту ИСО/МЭК 7498-1-94. Стандарт предлагает базовую эталонную модель взаимосвязи открытых систем (модель ВОС) и распространяется на системы, компьютерные сети и средства передачи инфор-

мации в части стандартизации протоколов обмена, т. е. совокупности правил, регламентирующих формат и процедуры обмена информацией открытых систем.

В соответствии с моделью ВОС сложная задача стандартизации протоколов обмена разбивается на отдельные конкретные задачи – уровни взаимодействия, в рамках каждого из которых разрабатываются свои «уровневые» протоколы обмена.

Разбивка задачи и стандартизация протоколов обмена позволяют принимать участие в ее решении большому количеству сторон – разработчиков программных и аппаратных средств, изготовителей коммуникационного и вспомогательного (например, тестового) оборудования, что позволяет избежать несовместимости друг с другом отдельных решений различных поставщиков.

Согласно модели ВОС вводится семь уровней взаимодействия [45].

Уровень 1. Физический уровень: обеспечивает установление, поддержание и разъединение связи («соединения») с учетом механических, электрических и функциональных характеристик среды передачи данных и средств связи. При необходимости обеспечивает также кодирование и модуляцию сигналов.

Уровень 2. Канальный уровень: обеспечивает надежность передачи данных по определенному каналу между двумя соседними узлами, а также установление, поддержание и разрыв соединений. Блок данных, передаваемых на канальном уровне, называется кадром. Процедуры канального уровня добавляют в передаваемые кадры соответствующие адреса, контролируют ошибки и при необходимости осуществляют повторную передачу кадров.

Уровень 3. Сетевой уровень: обеспечивает маршрутизацию пакетов (т. е. передачу через несколько каналов по одной или нескольким сетям). Передаваемый в сети передачи данных пакет имеет строго определенную структуру: заголовок пакета, содержащий соответствующие адреса и данные для контроля ошибок, а также само сообщение или его часть, поскольку передаваемое сообщение может быть разделено и пересылаться в виде последовательности пакетов. Формат пакета регламентируется протоколом управления соответствующей сети передачи данных.

Уровень 4. Транспортный уровень: обеспечивает надежную передачу данных между оконечными узлами сети, в том числе взаимодействующими через несколько промежуточных узлов или даже сетей передачи данных. Служит границей, ниже которой единицей передаваемой информации являются пакеты, а выше – сообщения.

Уровень 5. Сеансовый уровень: обеспечивает организацию и синхронизацию обмена данными между удаленными открытыми системами.

Уровень 6. Уровень представления данных: включает служебные операции, с помощью которых вышестоящий – прикладной уровень осуществляет преобразование передаваемых и принимаемых данных. Обеспечивает установление общих правил взаимодействия двух ЭВМ различных типов.

Уровень 7. Прикладной уровень: обеспечивает взаимодействие прикладных программ и интерфейс пользователя: электронная почта, передача файлов, идентификация пользователей и т. п.

Схема взаимодействия уровнейых протоколов модели ВОС при передаче информационного сообщения показана [57] на рис. 4.1.

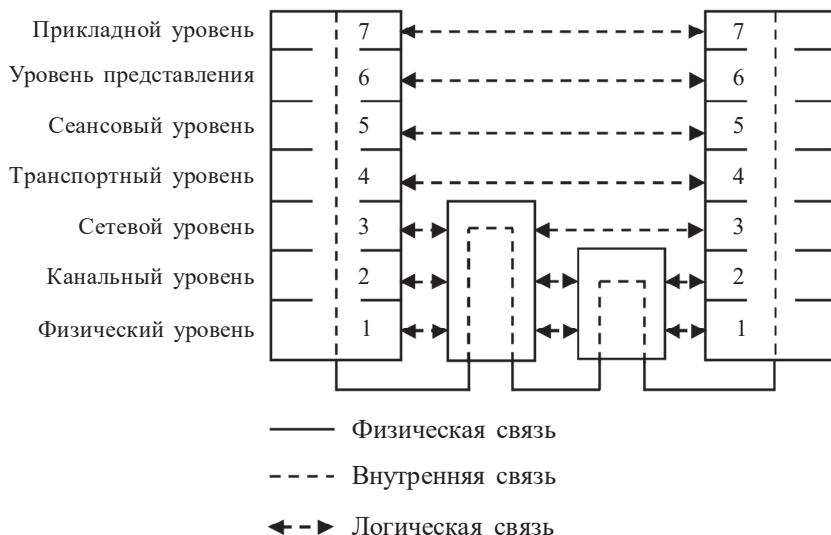


Рис. 4.1. Схема взаимодействия уровнейых протоколов модели ВОС

Внутри каждой открытой системы, участвующей в обмене информацией, взаимодействие между уровнями протоколами идет по вертикали (внутренняя связь на рис. 4.1). Взаимодействие между системами, участвующими в обмене информацией, логически происходит по горизонтали – между соответствующими уровнями (логическая связь на рис. 4.1). Реально же из-за отсутствия непосредственных горизонтальных связей производится спуск до нижнего уровня в источнике, связь через физическую среду (физическая связь на рис. 4.1) и подъем до соответствующего уровня в приемнике информации. В промежуточных системах, участвующих в передаче информации (см. рис. 4.1), подъем идет до того уровня, который доступен «интеллекту» такой системы.

Уровень, с которого посылается сообщение, и симметричный ему уровень в принимающей системе формируют свои блоки данных. На разных уровнях обмен происходит с использованием различных единиц информации: от битового обмена на физическом уровне до обмена пользовательскими сообщениями на прикладном уровне. Формируемые данные снабжаются служебной информацией данного уровня и спускаются на уровень ниже. На этом уровне к полученной информации также присоединяется служебная информация, и так, сопровождаемый обрастанием служебной информацией, происходит спуск формируемых данных до самого нижнего уровня системы. Наконец, по физической связи вся эта конструкция пересылается системе-получателю, где по мере подъема вверх она освобождается от служебной информации соответствующего уровня. В итоге сообщение, посланное источником, в «чистом» виде достигает соответствующего уровня системы-получателя, независимо от тех «приключений», которые с ним происходили во время путешествия по сети связи.

Служебная информация управляет процессом передачи и служит для контроля его успешности и достоверности. В случае возникновения проблем может быть сделана попытка их уладить на том уровне, где они обнаружены. Если уровень не может решить проблему, он сообщает о ней на вышестоящий уровень.

Наиболее близким к пользователю является прикладной уровень (уровень 7), который является высшим уровнем в модели ВОС и обеспечивает пользователю возможность решения стоящих перед ним задач. Уровни 3÷6 эталонной модели ВОС рассматривают специальные вопросы передачи информации в сетях передачи данных. Для построения измерительных систем, функционирующих в реальном масштабе времени, разработана [58] т. н. укрупненная модель ВОС, в которую входят только уровни 1, 2 и 7 базовой эталонной модели ВОС. В настоящей работе мы ограничимся рассмотрением стандарта ГОСТ Р МЭК 870-5-1 [8], который формулирует требования к протоколам обмена 1-го и 2-го уровней укрупненной модели ВОС.

4.2.1. Физический уровень базовой эталонной модели ВОС

Физический уровень обеспечивает непосредственное сопряжение с линией связи. Он обеспечивает механические, электрические, функциональные и процедурные средства для подключения, поддержания и отключения соединений физического уровня, предназначенных для побитовой передачи информации.

Физический уровень допускает дуплексную или полудуплексную передачу битовых потоков. Возможна последовательная или параллельная передача в соответствии с реализацией протокола внутри физического уровня.

Для последовательной передачи данных в одном направлении используют одну линию связи, по которой информационные биты передаются друг за другом последовательно. Последовательная передача по сравнению с параллельной позволяет сократить число линий связи и добиться улучшения связи на больших расстояниях. Поэтому ниже мы кратко рассмотрим протоколы последовательной передачи данных физического уровня модели ВОС.

Последовательная передача битов данных на физическом уровне может осуществляться в асинхронном или синхронном режиме [57]. При асинхронной передаче каждый символ сообщения (байт данных) передается отдельной посылкой. Посылка начинается со старт-

бита, сигнализирующего приемнику о начале посылки, за которым следуют биты данных и, возможно, бит четности. Завершает посылку стоп-бит, гарантирующий паузу между посылками (рис. 4.2).

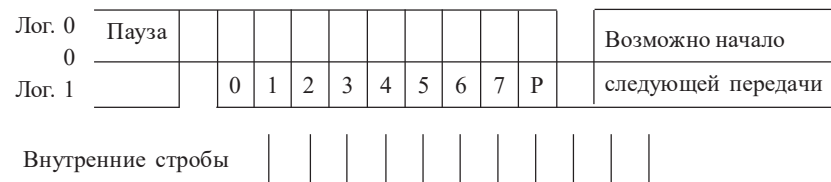


Рис. 4.2. Формат асинхронной передачи

Старт-бит следующего байта посылается в любой момент после стоп-бита, из-за чего режим и назван асинхронным. Старт-бит, имеющий всегда строго определенное значение (логический 0), обеспечивает простой механизм синхронизации приемника по сигналу от передатчика. Подразумевается, что приемник и передатчик работают на одной скорости обмена. Встроенный генератор синхронизации приемника генерирует внутренние стробы, по которым приемник фиксирует последующие принимаемые биты. В идеале стробы располагаются в середине битовых интервалов, что позволяет принимать данные и при незначительном рассогласовании скоростей приемника и передатчика, при котором строб последнего импульса посылки не выходит за пределы этого импульса (см. рис. 4.2).

Для асинхронного режима принят ряд стандартных скоростей обмена информацией: 50, 75, 110, 150, 300, 600, 1 200, 2 400, 4 800, 9 600, 19 200, 38 400, 57 600 и 115 200 бит/с.

Количество битов данных в посылке может составлять 5, 6, 7 или 8 (5- и 6-битные форматы распространены незначительно). Количество стоп-битов может быть 1, 1,5 или 2 («полтора бита» означает только длительность стопового интервала). Асинхронный режим является наиболее распространенным, его поддерживают последовательные СОМ-порты (интерфейс RS-232) всех ПЭВМ.

Синхронный режим передачи предполагает [57] постоянную активность канала связи. Передача посылки начинается с флага (синхробайта), за которым сразу же следует поток информации-

ных битов. Если у передатчика нет данных для передачи, он заполняет паузу непрерывной посылкой флагов. Синхронный режим предпочтителен для передачи больших массивов данных, что делает этот режим более удобным для использования протоколами верхних уровней модели ВОС.

Формат асинхронной посылки позволяет выявлять возможные ошибки передачи:

- если принят перепад (фронт импульса логического нуля), сигнализирующий о начале посылки, а по стробу старт-бита зафиксирован уровень логической единицы (сигнализирующий о конце посылки), то старт-бит считается ложным и приемник снова переходит в состояние ожидания. Об этой ошибке приемник может не сообщать;

- если во время, отведенное под стоп-бит (конец посылки), обнаружен уровень логического нуля (начало посылки), фиксируется ошибка стоп-бита;

- если применяется контроль четности, то после посылки битов данных передается бит четности. Этот бит дополняет количество единичных битов данных до четного или нечетного в зависимости от принятого соглашения. Прием байта с неверным значением бита четности приводит к фиксации ошибки.

Вместе с тем, если число ошибок велико, то описанная процедура контроля не гарантирует правильности приема информации. Например, если в результате воздействия помех два информационных бита одновременно изменяют свои значения на противоположные, то бит четности будет иметь требуемое значение и приемник сообщит, что принял сообщение без ошибок, хотя фактически оно отличается от переданного. В этом случае говорят [8] о обнаруженных ошибках, которые выступают в качестве характеристики качества используемого протокола передачи сообщений.

Функционирование канала связи физического уровня модели ВОС включает в себя обмен сигналами через границы раздела (интерфейсы) между компонентами канала. В числе таких компонентов обычно выделяют [44] оконечное оборудование данных (ООД), аппаратуру передачи данных (АПД) и линию связи.

Требования к интерфейсам ООД/АПД и АПД/линия связи представлены в ряде международных и российских стандартов.

Интерфейс ООД/АПД. В частности, в качестве стандартов интерфейсов ООД/АПД могут использоваться [57] стандарты RS-232C (V.24 и V.28, X.20bis и X.21bis), RS-423A (V.10 и X.26), а также российские стандарты, подготовленные на базе соответствующих международных стандартов, например, ГОСТ Р ИСО/МЭК 7480, ГОСТ Р ИСО 9543 и др. Следует заметить, что стандарт RS-232C, описывающий интерфейс для последовательной передачи данных между ООД и АПД, использовался в первых персональных компьютерах фирмы IBM и стал основой для всех последующих интерфейсов последовательного обмена данными. Интерфейс RS-232 аппаратно реализован на персональных компьютерах в виде микросхем и разъемов. В IBM PC его называют COM-портом (Communication port). Учитывая это обстоятельство, ниже ограничимся краткой характеристикой стандарта RS-232C [57].

Классическая схема соединения пары устройств ООД с использованием пары АПД приведена на рис. 4.3.

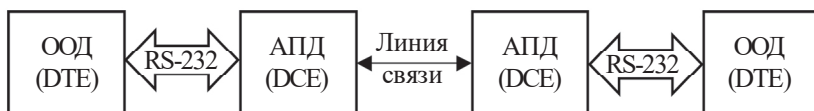


Рис. 4.3. Соединение аппаратуры ООД с использованием АПД

Для соединения на короткие расстояния устройства АПД могут быть исключены и пара устройств ООД соединяется нуль-модемным кабелем (рис. 4.4).



Рис. 4.4. Соединение аппаратуры ООД нуль-модемным кабелем

Стандарт RS-232C регламентирует типы применяемых разъемов. На аппаратуре ООД (в том числе на СОМ-портах) принято устанавливать вилки типа DB-25P или DB-9P, содержащие соответственно 25 и 9 контактов. На аппаратуре АПД (модемах) устанавливают розетки типа DB-25S или DB-9S. Это позволяет непосредственно соединять разъемы ООД и АПД (см. рис. 4.3) с помощью кабелей, контакты которых соединены «один в один» (см. рис. 4.5).

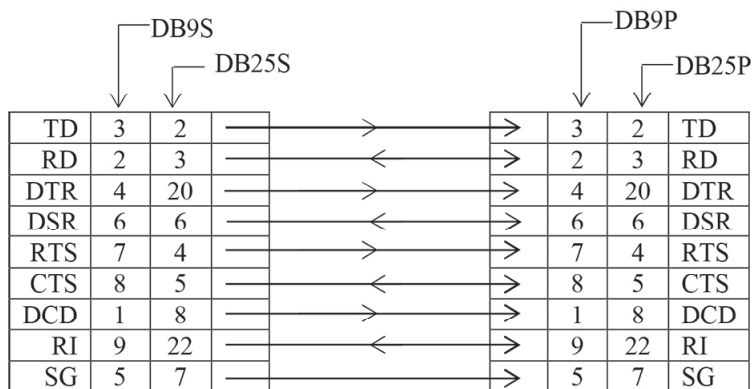


Рис. 4.5. Кабель для соединения разъемов аппаратуры ООД и АПД

Нуль-модемный кабель, используемый для соединения аппаратуры ООД на коротких расстояниях (см. рис. 4.4), имеет на обоих концах розетки, контакты которых соединяются перекрестно согласно рис. 4.6.

Назначение сигналов, представленных на рис. 4.5 и 4.6, приведено в табл. 4.1.

Интерфейс АПД/линия связи также относится к физическому уровню модели ВОС и в нашей стране называется стыком С1. В стране действует ряд стандартов, определяющих требования к характеристикам сигналов и процедурам передачи данных, разработанные на основе действующих международных стандартов для конкретных типов линий связи.

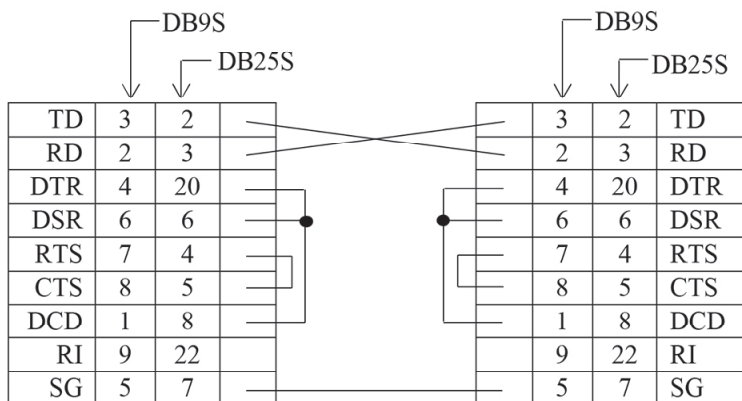


Рис. 4.6. Нуль-модемный кабель

Т а б л и ц а 4.1

Назначение сигналов интерфейса RS-232C

Сигнал	Назначение
SG	Сигнальная земля, относительно которой действуют уровни сигналов
TD	Последовательные данные – выход передатчика
RD	Последовательные данные – вход приемника
RTS	Выход запроса передачи данных: состояние «включено» уведомляет модем о наличии у терминала данных для передачи
CTS	Вход разрешения терминалу передавать данные
DSR	Вход сигнала готовности аппаратуры передачи данных
DTR	Вход сигнала готовности терминала к обмену данными
DCD	Запрос удаленной аппаратуры передачи данных на установление связи
RI	Индикация приема вызова удаленной аппаратуры передачи данных

В частности, передача данных в коммутруемых линиях связи телефонной сети общего пользования (стык С1-ТФ) определяется стандартами:

- ГОСТ 23504-79. Сигналы факсимильной информации, поступающие в каналы тональной частоты. Энергетические параметры и методы измерений;

- ГОСТ 25007-81. Стык аппаратуры передачи данных с каналами связи систем передачи с частотным разделением каналов. Основные параметры сопряжения;

- ГОСТ 26557-85. Сигналы передачи данных, поступающие в каналы связи. Энергетические параметры.

Требования к устройствам преобразования сигналов (модемам), функционирующим в выделенных физических линиях связи (стык С1-ФЛ), определены в стандартах:

- ГОСТ 24174-80. Устройства преобразования сигналов для первичных широкополосных каналов. Типы и основные параметры;

- ГОСТ 26532-85. Устройства преобразования сигналов аппаратуры передачи данных для некоммутируемых каналов тональной частоты. Типы и основные параметры.

Соответствующие российские и международные стандарты действуют в стране и для других типов линий связи.

4.2.2. Канальный уровень базовой эталонной модели ВОС

Этот уровень часто называют [56] также уровнем звена данных. На этом уровне реализуются следующие основные функции:

- **ф о р м и р о в а н и е** из передаваемой последовательности байтов **б л о к о в** данных определенного размера для их дальнейшего размещения в информационном поле передаваемого кадра, который и передается далее по каналу связи;

- **у п р а в л е н и е т е м п о м** выдачи данных в канал (управление потоком данных) для согласования скоростей работы источника информации (обычно это ПЭВМ) и каналаобразующей аппаратуры (например, модем);

- **к о д и р о в а н и е** содержимого кадра помехоустойчивым кодом (обычно это т. н. циклический код, о котором будем говорить

далее) с целью повышения помехоустойчивости передаваемого сообщения;

- обеспечение кодо независимой передачи данных (автоматизация кодирования и декодирования передаваемой информации), чтобы не загружать передающую и приемную стороны этой работой.

Детальную структуру протоколов канального уровня рассмотрим позднее, при анализе стандарта ГОСТ Р МЭК 870-5-1 [8]. По аналогии с протоколами физического уровня, содержащими служебную информацию в виде старт-, стоп-битов и бита четности, протоколы этого уровня также включают служебную информацию, представленную уже в виде стартовых, стоповых байтов и контрольного байта, организованных специальным образом. В частности, для защиты передаваемой информации от искажений при формировании служебных байтов используются специальные помехоустойчивые коды и соответствующие процедуры кодирования. Рассмотрим основные особенности формирования кодированных сообщений.

4.3. Кодирование информации

4.3.1. Двоичное кодирование

Двоичное кодирование информации сводится к тому, что все символы любого алфавита нумеруются в двоичной системе счисления, например: А – 0000 0001, Б – 0000 0010, В – 0000 0011 и т. д.

Легко подсчитать, что для обычного алфавита достаточно восьми двоичных разрядов, чтобы пронумеровать любую цифру и букву. Действительно: $2^8 = 256$, т. е., используя 8 двоичных разрядов, мы можем пронумеровать до 256 различных знаков, что вполне достаточно для большинства используемых алфавитов.

При таком подходе любое сообщение можно представить в виде массива 8-значных двоичных чисел. При передаче такого массива каждое двоичное число, содержащее 8 цифр и кодирующее определенную букву или цифру, называется байт, а каждая «1» или «0», входящая в байт, называется бит.

Общие требования к процедурам кодирования сообщений отражены в ГОСТ 26.014 [59]. Стандарт устанавливает требования к электрическим кодированным сигналам, предназначенным для информационной связи между компонентами ИС. Параметры электрических кодированных сигналов (амплитуда, длительность и т. д.) должны соответствовать требованиям к сигналам с дискретным изменением параметров по ГОСТ 26.013 [49].

Термины, устанавливаемые в ГОСТ 26.014 [59]:

К о д – совокупность условных символов, представляющих дискретные сообщения.

Д в о и ч н ы й н о р м а л ь н ы й к о д – каждая кодовая комбинация выражается сочетанием знаков «1» и «0» в системе счисления с основанием 2.

И з б ы т о ч н ы й к о д – число кодовых комбинаций больше общего числа символов, подлежащих кодированию.

К о д с п р о в е р к о й н а ч е т н о с т ь (н е ч е т н о с т ь) – кодовая комбинация содержит n разрядов, из которых $(n - 1)$ являются информационными, а в n -м разряде записывается сумма по модулю 2 (двоичная система счисления) всех информационных разрядов или ее инверсия (см. пример кода в табл. 4.2).

Т а б л и ц а 4.2

Пример кода с проверкой на четность для $n = 7$

Кодируемое число	Нормальный двоичный код	Код с проверкой на четность	Код с проверкой на нечетность
1	0000 001	0000 0011	0000 0010
2	0000 010	0000 0101	0000 0100
3	0000 011	0000 0110	0000 0111

Ц и к л и ч е с к и й к о д (n, K) – каждая кодовая комбинация содержит n разрядов, из которых K являются информационными, а $k = (n - K)$ – проверочными, обладающий следующим свойством: если кодовая комбинация $b = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ принадлежит коду,

то и любая комбинация вида $b' = (a_2, a_3, \dots, a_n, a_1)$, полученная циклической перестановкой составляющих, также принадлежит коду.

Циклический код характеризуется т. н. образующим полиномом $P(x)$, который используется для кодирования передаваемой информации и контроля правильности принятой информации.

Примеры образующих полиномов:

$$k = 6, P(x) = X^6 + X^5 + X^4 + 1;$$

$$k = 9, P(x) = X^9 + X^5 + X^3 + 1;$$

$$k = 11, P(x) = X^{11} + X^7 + X^3 + 1;$$

$$k = 16, P(x) = X^{16} + X^{12} + X^5 + 1.$$

Максимальная степень образующего полинома $k = (n - K)$ равна числу проверочных символов в кодовых комбинациях. В качестве образующих полиномов используются [52] неприводимые многочлены, т. е. такие многочлены, которые делятся без остатка только на себя или на единицу, иначе говоря, эти многочлены нельзя разделить на сомножители.

4.3.2. Циклическое кодирование

Циклический код относится к числу двоичных нормальных кодов, в которых кодирование информации осуществляется путем двоичного кодирования каждого символа кодируемого сообщения. Рассмотрим некоторые примеры, позволяющие понять процедуру этого вида кодирования информации [52].

Алгоритм циклического кодирования состоит в следующем:

- в качестве исходного используется представление некоторого кодируемого числа Z в двоичном нормальном коде.

Например, для $Z = 9 = 2^3 + 1 \Rightarrow 1\ 001$;

- для выполнения кодирования в соответствие этому числу Z ставится некоторый полином $F(X)$ степени $(K - 1)$, где K – число символов в двоичном представлении числа Z :

$$F(X) = \sum_{i=1}^{K-1} a_i \cdot X^i,$$

где a_i – разрядные коэффициенты, численно равные значению соответствующего разряда («0» или «1») числа Z .

Например, для $Z = 9 = 2^3 + 1 \Rightarrow 1\ 001$ полином

$$F(X) = X^3 + 1. \quad (4.6)$$

Каждый циклический код, как мы говорили, определяется т. н. образующим полиномом $P(X)$ степени $k = (n - K)$, где k – число проверочных символов в кодовой комбинации. Явный вид образующего полинома регламентируется стандартами.

Например, для $k = 3$ $P(X) = X^3 + X^2 + 1$.

Процедура кодирования. Существует по крайней мере два способа образования циклического кода. Чтобы понять процедуру кодирования, рассмотрим модельный пример циклического кода (7, 4), для которого длина кодовой комбинации $n = 7$ символов, из которых $K = 4$ – число информационных символов.

Способ кодирования 1

Простейший способ образования циклического кода заключается в перемножении полиномов $F(X)$ и образующего полинома $P(X)$ с приведением подобных членов по модулю 2.

Правила сложения и вычитания по модулю 2 имеют очень простой вид:

$$0 \pm 0 = 0;$$

$$0 \pm 1 = 1;$$

$$1 \pm 0 = 1;$$

$$1 \pm 1 = 0.$$

Для рассматриваемого примера:

$$Z = 9 = 2^3 + 1 \Rightarrow 1\ 001;$$

$$F(X) = X^3 + 1 \Rightarrow 1\ 001;$$

$$P(X) = X^3 + X^2 + 1 \Rightarrow 1\ 001.$$

Процедура кодирования по способу 1

Перемножаем полиномы $P(X)$ и $F(X)$ с приведением подобных по модулю 2:

$$\begin{array}{r}
 X^3 + X^2 + 1 \\
 \hline
 X^3 + 1 \\
 \hline
 X^3 + X^2 + 1 \\
 \hline
 X^6 + X^5 + X^3 \\
 \hline
 X^6 + X^5 + X^2 + 1 \quad \Rightarrow 1 \ 100 \ 101,
 \end{array}$$

откуда

$$Q(X) = P(X) F(X) = X^6 + X^5 + X^2 + 1 \Rightarrow 1 \ 100 \ 101. \quad (4.7)$$

Как видим, результат кодирования отличается от исходных полиномов.

Процедура декодирования по способу 1

Процедура декодирования в данном случае заключается в делении полинома $Q'(X)$, полученного по каналу связи на образующий полином $P(X)$, и приведении подобных членов по модулю 2. Пусть передача прошла без искажений и полученный полином совпадает с переданным $Q'(X) = Q(X)$. Тогда при делении получим:

$$\begin{array}{r}
 X^6 + X^5 + X^2 + 1 \quad \left| \begin{array}{l} X^3 + X^2 + 1 \\ X^3 + 1 \end{array} \right. \\
 \hline
 X^6 + X^5 + X^3 \\
 \hline
 X^3 + X^2 + 1 \\
 \hline
 X^3 + X^2 + 1 \\
 \hline
 0
 \end{array}$$

Если в результате деления получаем, как в настоящем случае, нулевой остаток, то считается, что передача прошла без искажений и на выходе канала передачи мы получили то же самое значение, что было на входе.

Проверим свойство циклического кода: циклическая перестановка символов кода должна приводить к разрешенной кодовой комбинации. Переставим 1 из начала в конец полученного кода:

$$\underline{1} \ 100 \ 101 \Rightarrow 1 \ 001 \ 01\underline{1}, \text{ т. е. } Q'(X) = X^6 + X^3 + X + 1.$$

$$\begin{array}{r|l}
X^6 + X^3 + X + 1 & X^3 + X^2 + 1 \\
\hline
X^6 + X^5 + X^3 & X^3 + X^2 + X + 1 \Rightarrow 1111 \Rightarrow 2^3 + 2^2 + 2 + 1 = \\
\hline
X^5 + X + 1 & = 15 \text{ вместо } Z = 9 \\
\hline
X^5 + X^4 + X^2 & \\
\hline
X^4 + X^2 + X + 1 & \\
\hline
X^4 + X^3 + X & \\
\hline
X^3 + X^2 + 1 & \\
\hline
X^3 + X^2 + 1 & \\
\hline
0 &
\end{array}$$

Таким образом, нулевой остаток, полученный от деления модифицированной кодовой комбинации на образующий полином $P(X)$, свидетельствует о том, что циклическая перестановка символов ведет к разрешенной кодовой комбинации циклического кода.

Рассмотрим влияние помех на передачу кодированного сообщения. В теории помехозащищенных кодов помехи характеризуются кратностью помехи r .

К р а т н о с т ь п о м е х и r — это число символов кода, которые помеха способна одновременно исказить (заменить «0» на «1» или наоборот). Так, однократная помеха ($r = 1$) искажает один разряд кодовой комбинации, двукратная ($r = 2$) — два и т. д. Рассмотрим, в частности, влияние однократной помехи.

Если при передаче сообщения в результате воздействия помехи произошло искажение передаваемой информации и вместо полинома

$$Q(X) = 1\ 100\ 101$$

был принят другой, например:

$$Q'(X) = 1\ 100\ 111$$

(искажился второй бит с конца), то процедура декодирования должна обнаружить ошибку. Проверим это:

$$Q'(X) = 1\ 100\ 111 \Rightarrow X^6 + X^5 + X^2 + X + 1. \quad (4.8)$$

$$\begin{array}{r|l}
X^6 + X^5 + X^2 + X + 1 & X^3 + X^2 + 1 \\
X^6 + X^5 + X^3 & X^3 + 1 \\
\hline
& X^3 + X^2 + X + 1 \\
& X^3 + X^2 + 1 \\
\hline
& X
\end{array}$$

Как видно из приведенного примера, в результате деления получили ненулевой остаток, который свидетельствует о том, что в процессе передачи допущено искажение передаваемой информации. Интересно отметить, что остаток выделяет как раз искаженный бит. На этом свойстве циклического кодирования основана возможность выделения искаженных битов и коррекции искажений, вносимых линией связи. Процедура коррекции искажений достаточно сложна и поэтому не будет рассматриваться в нашем изложении.

Заметим, что описанная выше процедура обнаружения ошибок неидеальна. Легко сообразить, помехи какого вида не должны обнаруживаться процедурой декодирования по способу 1. А именно, если к кодовой комбинации $Q(X)$ добавить комбинацию, которая нацело делится на образующий полином (например, просто образующий полином), то процедура декодирования не обнаружит искажения информации. Искажения передаваемой информации такого типа называются необнаруженными ошибками. Проверим это практически:

$$\begin{aligned}
F(X) &= X^3 + 1 \Rightarrow 1\ 001; \\
P(X) &= X^3 + X^2 + 1 \Rightarrow 1\ 101; \\
Q(X) &= F(X) \cdot P(X) = X^6 + X^5 + X^2 + 1 \Rightarrow 1\ 100\ 101 \text{ (см. (4.7));} \\
Q'(X) &= Q(X) + P(X) = \\
&= (X^6 + X^5 + X^2 + 1) + (X^3 + X^2 + 1) = \\
&= X^6 + X^5 + X^3 \Rightarrow 1\ 101\ 000.
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Из сравнения (4.7) и (4.9) видно, что в данном случае кратность помехи $r = 3$.

$$\begin{array}{r|l} X^6 + X^5 + X^3 & X^3 + X^2 + 1 \\ \hline X^6 + X^5 + X^3 & X^3 \end{array} \Rightarrow 1\ 000 \Rightarrow 2^3 \Rightarrow 8 \text{ вместо } Z = 9$$

0

Как и следовало ожидать, помеха рассмотренного класса оказалась необнаруженной.

Неудобство рассмотренного способа кодирования состоит в том, что проверочные и информационные символы не отделены друг от друга, что затрудняет наглядность процесса декодирования. Разделение проверочных и информационных символов осуществляется во втором способе кодирования.

Способ кодирования 2

Процедура кодирования в данном случае более сложная: исходная кодовая комбинация нормального кода, описываемая полиномом $F(X)$, умножается на X^k , где $k = (n - K)$ – число проверочных символов; n – длина кодовой комбинации; K – число информационных битов.

В результате умножения получаем полином $F(X) \cdot X^k$, первые K символов которого совпадают с исходной кодовой комбинацией нормального кода.

Полученное произведение $F(X) \cdot X^k$ делят на образующий полином с приведением подобных членов по модулю 2. Остаток от деления – полином $R(X)$ добавляется к произведению $F(X) \cdot X^k$, образуя код числа $Q(X) = F(X) \cdot X^k + R(X)$.

Процедура кодирования по способу 2

Выполним процедуру кодирования по способу 2 для случая исходных данных примера 1.

Пусть имеем циклический код вида $(7, 4)$ с образующим полиномом $P(X) = X^3 + X^2 + 1$.

Пусть $Z = 9 = 2^3 + 1$, т. е. $F(X) = X^3 + 1 \Rightarrow 1\ 001$.

Тогда $F(X) \cdot X^3 = X^6 + X^3 \Rightarrow 1\ 001\ 000$.

Как уже говорили, первые K символов кодовой комбинации соответствуют исходной кодовой комбинации нормального кода.

Находим остаток $R(X)$ от деления $F(X) \cdot X^3$ на $P(X)$:

$$\begin{array}{r}
 X^6 + X^3 \\
 \underline{X^6 + X^5 + X^3} \\
 X^5 \\
 \underline{X^5 + X^4 + X^2} \\
 X^4 + X^2 \\
 \underline{X^4 + X^3 + X} \\
 X^3 + X^2 + X \\
 \underline{X^3 + X^2 + 1} \\
 X + 1 = R(X)
 \end{array}$$

В таком случае результат кодирования по способу 2 имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Q(X) &= F(X) \cdot X^k + R(X) = \\
 &= X^6 + X^3 + X + 1 \Rightarrow 1\ 001\ 011.
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Как видим, результат кодирования достаточно прост: первые четыре бита соответствуют исходной кодовой комбинации $F(X)$, последние три цифры образуют проверочную последовательность. Переданное сообщение определяется как старшие биты $Q'(X)$, деленные на X^k , т. е. на X^3 : $(X^6 + X^3)/X^3 = X^3 + 1 \Rightarrow 1\ 001 \Rightarrow 9$, что и требовалось доказать.

Процедура декодирования по способу 2

Процедура декодирования в данном случае заключается в делении полинома $Q'(X)$, полученного по каналу связи, на образующий полином $P(X)$ и приведении подобных членов по модулю 2. Пусть принятое сообщение совпадает с переданным $Q'(X) = Q(X)$.

Тогда при делении получим:

$$\begin{array}{r}
 X^6 + X^3 + X + 1 \quad \left| \begin{array}{l} X^3 + X^2 + 1 \\ X^3 + X^2 + X + 1 \end{array} \right. \\
 \hline
 X^6 + X^5 + X^3 \\
 \hline
 X^5 + X + 1 \\
 \hline
 X^5 + X^4 + X^2 \\
 \hline
 X^4 + X^2 + X + 1 \\
 \hline
 X^4 + X^3 + X \\
 \hline
 X^3 + X^2 + 1 \\
 \hline
 X^3 + X^2 + 1 \\
 \hline
 0
 \end{array}$$

Если в результате деления получаем, как в настоящем случае, нулевой остаток, то считается, что передача прошла без искажений и на выходе канала передачи мы получили то же самое значение, что было на входе.

С другой стороны, если при передаче в результате воздействия помехи с кратностью $r = 1$ произошло искажение передаваемой информации и вместо исходного полинома

$$Q(X) = X^6 + X^3 + X + 1 = 1 \underline{001} 011$$

принят другой, например:

$$Q'(X) = X^6 + X^5 + X^3 + X + 1 = 1 \underline{101} 011 \quad (4.11)$$

(исказился второй с начала бит), то процедура декодирования должна обнаружить возникшую ошибку. Проверим это непосредственным делением:

$$\begin{array}{r}
 X^6 + X^5 + X^3 + X + 1 \quad \left| \begin{array}{l} X^3 + X^2 + 1 \\ X^3 \end{array} \right. \\
 \hline
 X^6 + X^5 + X^3 \\
 \hline
 X + 1 \quad = R'(X)
 \end{array}$$

Как видно из приведенного примера, результат деления отличен от нуля, что свидетельствует о возникшей при передаче ошибке.

Заметим, однако, что описанная выше процедура проверки также не идеальна. Снова легко сообразить, помехи какого вида не должны обнаруживаться процедурой декодирования циклического кода. А именно, если к кодовой комбинации $Q(X)$ в результате воздействия помехи добавляется комбинация, описываемая полиномом, кратным образующему полиному $P(X)$, то процедура декодирования не должна зафиксировать появление ошибки. Искажения передаваемой информации такого сорта называются необнаруженными ошибками.

Покажем это на примере:

$$Z = 9 = 2^3 + 1 \Rightarrow 1\ 001, \text{ т. е.}$$

$$F(X) = X^3 + 1 \Rightarrow 1\ 001;$$

$$P(X) = X^3 + X^2 + 1 \Rightarrow 1\ 101;$$

$$R(X) = X + 1 \Rightarrow 011;$$

$$Q(X) = F(X) \cdot X^k + R(X) = X^6 + X^3 + X + 1 \Rightarrow 1\ 001\ 011 \text{ (см. (4.10));}$$

$$\begin{aligned} Q'(X) &= Q(X) + P(X) = (X^6 + \underline{X^3} + X + \underline{1}) + \\ &+ (\underline{X^3} + X^2 + \underline{1}) = X^6 + X^2 + X \Rightarrow 1\ 000\ 110. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Как видно из (4.10) и (4.12), кратность помехи в этом случае равна $r = 3$.

Снова переданное сообщение определяется как старшие биты $Q'(X)$, деленные на X^k , т. е. на X^3 : $X^6 / X^3 = X^3 \Rightarrow 1\ 000 \Rightarrow 2^3 = 8$ вместо 9!

Делим $Q'(X)$ на $P(X)$, проверяя процедуру декодирования:

$$\begin{array}{r|l} X^6 + X^2 + X & X^3 + X^2 + 1 \\ X^6 + X^5 + X^3 & X^3 + X^2 + X \\ \hline X^5 + X^3 + X^2 + X & \\ X^5 + X^4 + X^2 & \\ \hline X^4 + X^3 + X & \\ X^4 + X^3 + X & \\ \hline 0 & \end{array}$$

Как и следовало ожидать, помеха выбранного вида оказалась необнаруженной.

4.4. Кодовое расстояние и помехозащищенность кода

Как показали приведенные примеры, обнаружение ошибок в переданном сообщении зависит, вообще говоря, от количества внесенных при передаче ошибок или от степени отличия исходного и принятого сообщений.

Для характеристики отличия одной кодовой комбинации от другой вводится специальный термин – кодовое расстояние.

К о д о в о е р а с с т о я н и е d – это характеристика различия между двумя кодовыми комбинациями, численно равная числу одноименных разрядов с отличными символами [52]. Чтобы найти значение кодового расстояния d между двумя кодовыми комбинациями двоичного кода, достаточно подсчитать число единиц, содержащихся в сумме этих кодовых комбинаций по модулю 2.

Для рассмотренных выше примеров, в частности, имеем:

- в случае однократной помехи кодовое расстояние между неискаженной и искаженной кодовыми комбинациями при кодировании и декодировании по способу 1 равно:

искаженные сигналы:

$$Q(X) = 1 \ 100 \ 1\underline{0}1 \text{ (см. (4.7));}$$

$$Q'(X) = 1 \ 100 \ 1\underline{1}1 \text{ (см. (4.8));}$$

сумма по модулю 2 равна: $0 \ 000 \ 010 \Rightarrow d = 1$;

- в случае однократной помехи кодовое расстояние между неискаженной и искаженной кодовыми комбинациями при кодировании и декодировании по способу 2 равно:

искаженные сигналы:

$$Q(X) = X^6 + X^3 + X + 1 = 1 \ 0\underline{0}1 \ 011 \text{ (см. (4.10));}$$

$$Q'(X) = X^6 + X^5 + X^3 + X + 1 = 1 \ 1\underline{0}1 \ 011 \text{ (см. (4.11));}$$

сумма по модулю 2 равна: $0 \ 100 \ 000 \Rightarrow d = 1$.

В случае необнаруженной ошибки в способе 1 (кратность помехи $r = 3$):

искаженные сигналы:

$$Q(X) = F(X) \cdot P(X) = X^6 + X^5 + X^2 + 1 \Rightarrow 1\ 100\ 101 \text{ (см. (4.7))};$$

$$\begin{aligned} Q'(X) &= Q(X) + P(X) = (X^6 + X^5 + X^2 + 1) + (X^3 + X^2 + 1) = \\ &= X^6 + X^5 + X^3 \Rightarrow 1\ 101\ 000 \text{ (см. (4.9))}; \end{aligned}$$

сумма по модулю 2 равна: $0\ 001\ 101 \Rightarrow d = 3$.

В случае необнаруженной ошибки в способе 2 (кратность помехи $r = 3$):

искаженные сигналы:

$$Q(X) = F(X) \cdot X^k + R(X) = X^6 + X^3 + X + 1 \Rightarrow 1\ 001\ 011 \text{ (см. (4.10))};$$

$$\begin{aligned} Q'(X) &= Q(X) + P(X) = (X^6 + \underline{X^3} + X + \underline{1}) + (\underline{X^3} + X^2 + \underline{1}) = \\ &= X^6 + X^2 + X \Rightarrow 1\ 000\ 110 \text{ (см. (4.12))}; \end{aligned}$$

сумма по модулю 2 равна: $0\ 001\ 101 \Rightarrow d = 3$.

Кодовое расстояние играет важную роль при рассмотрении помехозащищенности кодов. Чем больше значение d , тем труднее при прочих равных условиях помехам исказить кодовую комбинацию настолько, чтобы ошибка не была обнаружена.

Для оценки помехозащищенности кодов оценим на простом примере вероятность появления помех различной кратности r и влияние таких помех на появление необнаруженных ошибок для кодов с различными кодовыми расстояниями d . Пусть мы передаем кодовое сообщение длиной n бит. Будем полагать, что вероятность искажения элементарного сигнала (бита) при передаче p и что искажения возникают не слишком часто. Поэтому искажения можно считать независимыми одно от другого. Это разумное предположение, которое позволяет упростить проведение оценок. Искажения информации при передаче не должны быть слишком частыми, иначе мы просто ничего не сможем передать.

При указанных предположениях вероятность R_k появления k искаженных битов в принятом сообщении длиной n бит (вероятность появления ошибки кратности k) определяется функцией рас-

предела биномиального распределения $P(n, k)$ и может быть записана в виде

$$R_k \equiv P(n, k) = \frac{n!}{(n-k)! \cdot k!} p^k (1-p)^{n-k}. \quad (4.13)$$

Из приведенного соотношения вытекает, что вероятность безошибочной ($k=0$) передачи сообщения длиной n бит T равна:

$$T \equiv P(n, k=0) = (1-p)^n.$$

Соответственно, вероятность принять искаженное сообщение R_Σ равна:

$$R_\Sigma = 1 - (1-p)^n.$$

Вероятность принять искаженное сообщение R_Σ включает в себя ошибки всех возможных кратностей от $k=1$ (однократная ошибка с вероятностью R_1) до $k=n$ (ошибка кратности n с вероятностью R_n).

На рис. 4.7 для заданной длины сообщения $n=10$ представлены зависимости вероятности безошибочной передачи T и вероятностей R_Σ, R_1, R_4, R_6 и R_{10} от вероятности искажения элементарного сигнала (бита) p , рассчитанные из (4.13).

Как видно из рис. 4.7, вероятность безошибочной передачи $T(p)$ монотонно убывает с ростом вероятности искажения элементарного сигнала (бита) p . При $p \rightarrow 0$ $T \approx (1-np)$, а при $p \rightarrow 1$ $T=0$. Иначе говоря, при достаточно большом значении p вероятность безошибочной передачи сообщения заданной длины стремится к нулю.

Вероятность принять искаженное сообщение R_Σ в противоположность зависимости $T(p)$ монотонно растет с ростом p . При $p \rightarrow 0$ $R_\Sigma \approx np$, а при $p \rightarrow 1$ $R_\Sigma = 1$. Иначе говоря, при достаточно большом значении p вероятность принять искаженное сообщение стремится к единице.

Вероятности кратных ошибок R_1, R_4, R_6 и R_{10} кратности 1, 4, 6 и 10, представленные пунктирными кривыми на рис. 4.7, немонотонно изменяются с ростом значения p . При малых значениях p эти вероятности растут, достигая максимального значения, а затем

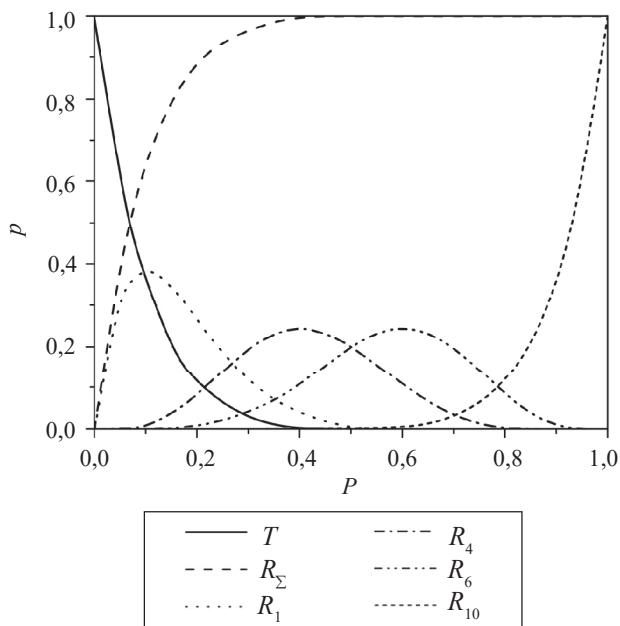


Рис. 4.7. Зависимости вероятностей T , R_Σ , R_1 , R_4 , R_6 и R_{10} от p

убывают до 0 при $p \rightarrow 1$. Исключением является вероятность R_{10} , которая монотонно растет с ростом p , достигая значения $R_{10} = 1$ при $p \rightarrow 1$.

Положение максимума зависимости $R_k(p)$ можно получить, дифференцируя функцию (4.13) по p и приравнявая значение производной нулю. В результате нетрудно получить, что максимум зависимости $R_k(p)$ имеет место при

$$p = k/n,$$

что хорошо согласуется с данными, представленными на рис. 4.7.

Как видно из рис. 4.7, наибольшую опасность при малых значениях p представляют ошибки минимальной кратности – однократные в первую очередь (вероятность этих ошибок наибольшая). Однако с ростом значения p имеет место преобладание ошибок большей кратности. Поэтому возникает вопрос о степени защищенности кодов от помех различной кратности.

Для характеристики помехозащищенности кода в целом вводят понятие минимального кодового расстояния d_{\min} — минимального расстояния между любыми рабочими комбинациями кода. Величина d_{\min} характеризует минимальную кратность помехи, которая может привести к необнаруживаемым ошибкам, т. е. к приему ложных сообщений.

Так, при $d_{\min} = 1$ уже однократная помеха, т. е. помеха, искажающая всего один бит в кодовой комбинации, достаточна для появления ложного сообщения.

Очевидно, что для обнаружения всех ошибок кратности до r минимальное кодовое расстояние должно быть равно:

$$d_{\min} = r + 1.$$

Записанное условие означает, что любая помеха кратности до r включительно не сможет перевести рабочую комбинацию кода в другую, т. е. не сможет привести к образованию ложного сообщения.

Построение помехозащищенного кода с заданным кодовым расстоянием, т. е. выбор образующего полинома $P(X)$ по заданным значениям длины кодовой комбинации n и кодовому расстоянию d , представляет собой сложную математическую задачу, связанную, в частности, с определением значения минимального кодового расстояния для выбранного образующего полинома. Мы не можем здесь вдаваться в тонкости этой процедуры и приведем [52] только табл. 4.3. В этой таблице представлен вид образующих полиномов $P(X)$ для $d_{\min} = 3$ и разных значений максимальной длины кодовой комбинации n_{\max} , в которой содержится K информационных битов.

Представленная таблица подтверждает полученные нами выше результаты. Для циклического кода $(7, 4)$ с образующим полиномом $P(X) = X^3 + X^2 + 1$ кодовое расстояние между исходной и искаженной кодовыми комбинациями при наличии необнаруженных ошибок равнялось $d = 3$ в полном соответствии с результатами, представленными в первой строке табл. 4.3.

Заметим, что процедура построения образующих полиномов не только сложна, но и неоднозначна. В частности, для рассмотренного нами случая $k = 3$ можно найти в литературе образующий

Образующий полином $P(X)$ для $d_{\min} = 3$

$k = n - K$	n_{\max}	K	$P(X)$
3	7	4	$X^3 + X^2 + 1$
4	15	11	$X^4 + X + 1$
5	31	26	$X^5 + X^2 + 1$
6	63	57	$X^6 + X + 1$
7	127	120	$X^7 + X^6 + X^3 + 1$
8	255	247	$X^8 + X^4 + X^3 + X^2 + 1$

полином вида $P(X) = X^3 + X + 1$, который наравне с рассматривавшимся выше полиномом $P(X) = X^3 + X^2 + 1$ может использоваться для построения циклического кода.

4.5. Нормативные требования к достоверности передаваемых данных

Проведенное рассмотрение позволяет нам перейти к количественной оценке качества передачи данных, т. е. к определению достоверности (целостности) передачи данных. Количественные требования к достоверности передаваемой информации содержатся в стандартах ГОСТ 26.205 [54] и ГОСТ Р МЭК 870-5-1 [8], к рассмотрению которых мы и переходим.

ГОСТ 26.205 распространяется на комплексы и устройства телемеханики, в том числе программно-управляемые, предназначенные для выполнения ряда функций:

- телеизмерение текущих и интегральных значений параметров;
- передача данных по каналам (линиям связи);
- ретрансляция информации и ряд других функций.

Как видно из выполняемых функций, комплексы и устройства телемеханики представляют собой частный случай ИС, в котором

явно выделена функция передачи результатов измерений удаленному потребителю. Поэтому данный стандарт наиболее полно отражает все возникающие при передаче информации проблемы. Стандарт определяет типовые требования к устойчивости комплексов и устройств телемеханики к внешним воздействиям и формулирует ряд требований к процедурам обработки измерительной информации. В частности, требования к достоверности передачи измерительной информации в [54] сформулированы следующим образом:

- по достоверности передачи информации изделия телемеханики должны соответствовать требованиям табл. 4.4 при наличии на стыке приемника сигнала с каналом (линией) связи нормального флуктуационного шума и отношении амплитуды сигнала к эффективному значению шума в полосе приема, равном 7;
- по достоверности передачи информации изделия телемеханики должны соответствовать требованиям табл. 4.4 при вероятности искажения элементарного сигнала на стыке с каналом передачи данных, равной 10^{-4} , и независимых ошибках.

Т а б л и ц а 4.4

Требования к достоверности передачи измерительной информации

Характеристика	Вероятность события, не более
Вероятность трансформации знака данных или отсчета телеизмерения	10^{-7}
Вероятность потери информации при повторении передачи до 5-ти раз подряд	10^{-8}
Вероятность образования ложных сигналов телеизмерения и телесигнализации	10^{-12}

ГОСТ 26.205 устанавливает требования к достоверности для фиксированного значения вероятности искажения элементарного сигнала (бита) $p = 10^{-4}$. Более общие требования, соответствующие про-

извольным значениям p , представлены в ГОСТ Р МЭК 870-5-1 [8], который устанавливает основные требования к функциям, выполняемым на физическом и канальном уровнях модели ВОС в системах телемеханики. В частности, стандарт устанавливает требования по кодированию и структуре кадров передаваемой информации, отвечающие заданным требованиям по достоверности данных.

Для передачи данных в системах телемеханики ГОСТ Р МЭК 870-5-1 [8] устанавливает три различных класса достоверности данных: J_1 , J_2 и J_3 . Использование того или иного класса зависит от характера данных. На рис. 4.8 приведено графическое представление верхних пределов вероятности появления необнаруженных ошибок R в зависимости от вероятности искажения элементарного сигнала (бита) p для трех указанных классов достоверности данных. Благодаря использованию двойной логарифмической шкалы зависимости $R(p)$ на рис. 4.8 имеют кусочно-линейный характер.

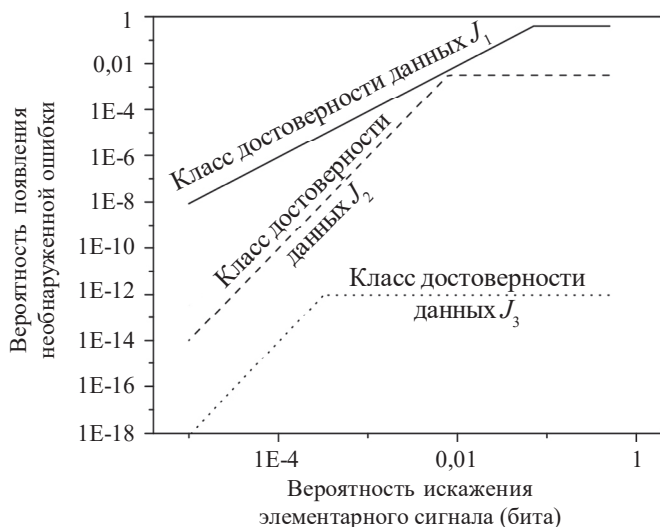


Рис. 4.8. Характеристики классов достоверности данных

Максимальное значение $p = 0,5$ на рис. 4.8 соответствует случаю приема произвольного значения бита, т. е. сигнал отсутствует, а принимаются только помехи. Наклон прямых для $p \leq 10^{-4}$ соот-

ветствует минимальному кодовому расстоянию d_{\min} для применяемого метода кодирования. Так получается благодаря тому, что сообщения, в которых число искаженных бит равно d_{\min} , вносят наиболее значительный вклад в число необнаруженных ошибок при $p \leq 10^{-4}$.

Качество каналов передачи данных должно непрерывно контролироваться. Средняя вероятность ошибки на бит должна быть меньше 10^{-4} , чтобы получить требуемую общую достоверность данных.

Для низшего класса достоверности J_1 требуется минимальное кодовое расстояние $d_{\min} = 2$, в то время как для классов J_2 и J_3 требуются коды с минимальным кодовым расстоянием $d_{\min} = 4$. Кроме того, для класса J_3 вероятность появления необнаруженных ошибок не должна превышать $R = 10^{-12}$ при любом значении p .

Для иллюстрации возможностей этих трех классов достоверности данных рассмотрим канал передачи данных с белым шумом, амплитуда которого соответствует вероятности искажения элементарного сигнала (бита) $p = 10^{-4}$, что определяет низкое, но не самое худшее качество передачи. При непрерывной передаче по этому каналу блоков сообщений по $n = 100$ бит со скоростью $V = 1\,200$ бит/с среднее время T между необнаруженными ошибками определяется соотношением [8]:

$$T = \frac{n}{V \cdot R(p)}, \quad (4.14)$$

где $R(p)$ – вероятность появления необнаруженных ошибок при значении $p = 10^{-4}$, указанная на рис. 4.8 для рассматриваемых классов достоверности данных.

Рассчитанные из соотношения (4.14) значения T , характеризующие качество передачи информации для классов достоверности J_1 , J_2 и J_3 , представлены в табл. 4.5.

Для реализации указанных классов достоверности ГОСТ Р МЭК 870-5-1 [8] устанавливает четыре формата передаваемых кадров для канального уровня модели ВОС: FT1.1, FT1.2, FT2 и FT3. Рассмотрим характеристики этих кодовых форматов.

Значения T для классов достоверности J_1, J_2, J_3

Класс	$R(p)$	T	Типовое применение канала
J_1	10^{-6}	1 день	Циклические системы: телеизмерения
J_2	10^{-10}	26 лет	Передача при возникновении переключения (события)
J_3	10^{-14}	260 000 лет	Передача важной и аварийной информации

Структура кадра формата FT1.1 (класс достоверности J_1) представлена на рис. 4.9 и определяет кадр переменной длины с минимальным кодовым расстоянием $d_{\min} = 2$. Кадр содержит L байтов пользовательских данных (L может принимать значения от 0 до 127) и еще один стартовый байт, в котором указывается значение L , выраженное в двоичном исчислении. При этом каждый байт кадра содержит стартовый, стоповый биты, бит четности и 8 битов данных.

Формат класса FT1.2 (класс достоверности J_2) определяет кадры с минимальным кодовым расстоянием $d_{\min} = 4$ и может использоваться для передачи заданного числа байтов пользовательских данных L . В случае фиксированного значения L структура кадра представлена на рис. 4.10.

Как видно из рис. 4.10, в состав кадра входят байт стартового слова (начало кадра), фиксированное число L байтов пользовательских данных, байт контрольной суммы (КС) и байт слова окончания. Контрольная сумма (8 битов) – это сумма по модулю 256 всех байтов пользовательских данных. При этом каждый байт кадра содержит стартовый, стоповый биты, бит четности и 8 битов данных.

Структура кадра формата FT1.2 (класс достоверности J_2) с переменным числом байтов пользовательских данных L представлена на рис. 4.11. Как видно из рисунка, кадр состоит из двух

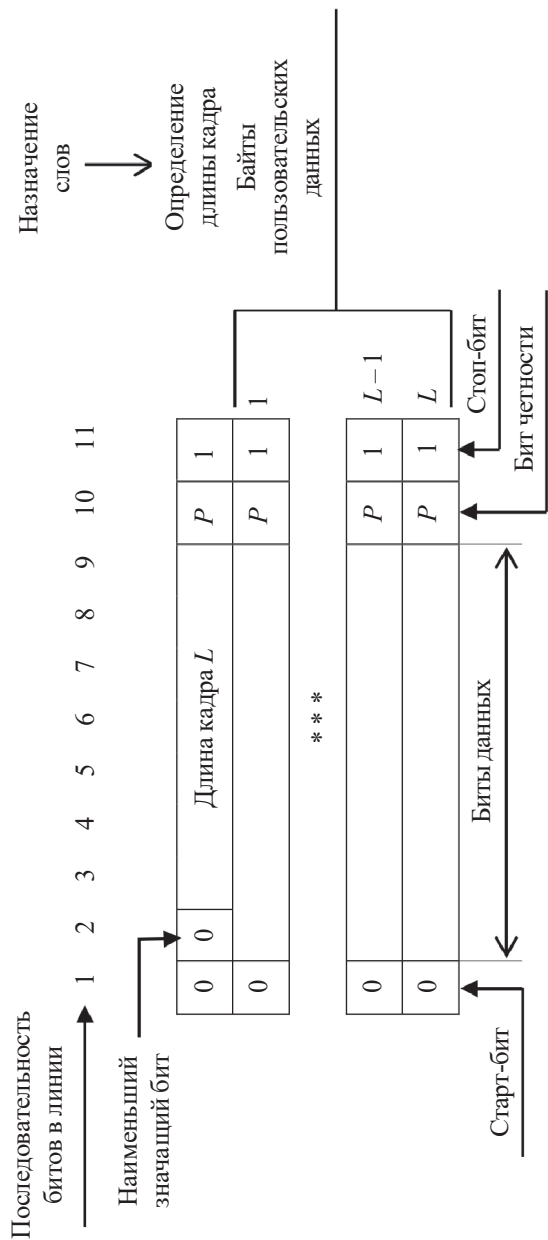


Рис. 4.9. Структура кадра формата FT1.1

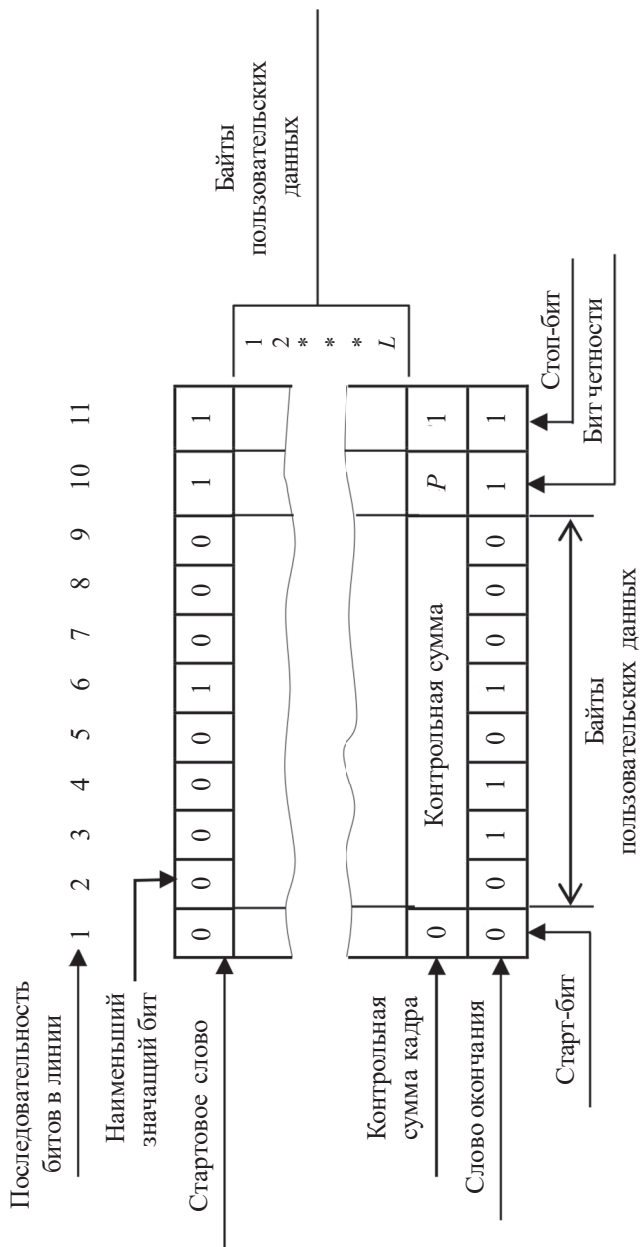


Рис. 4.10. Структура кадра формата FT1.2 фиксированной длины

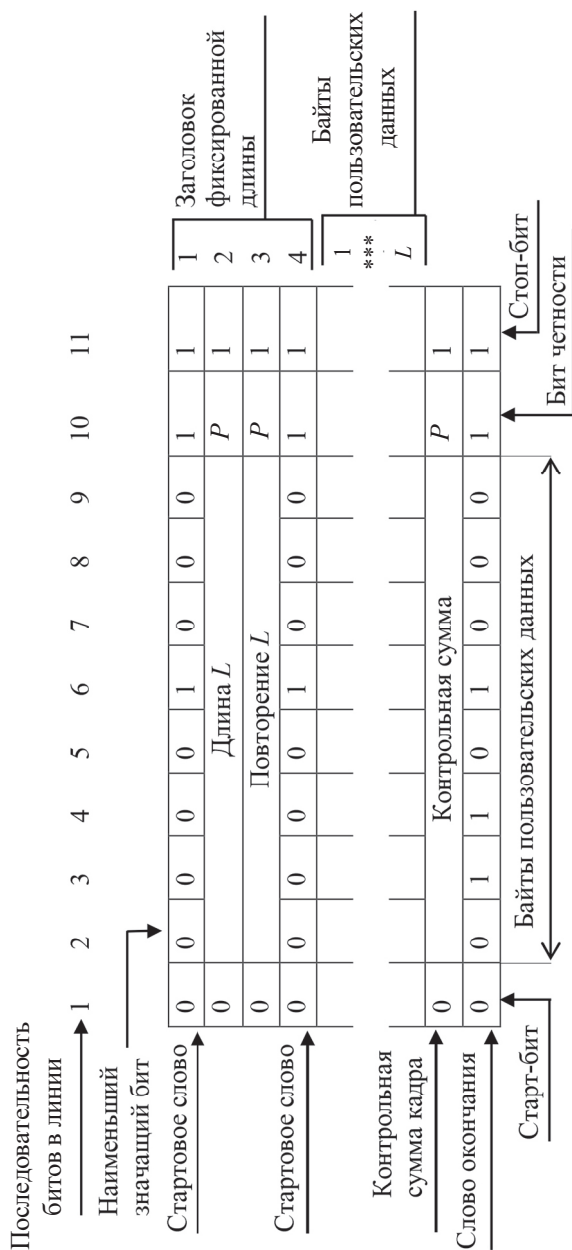


Рис. 4.11. Структура кадра формата FT1.2 переменной длины

одинаковых стартовых слов (1-го и 4-го), двух одинаковых слов (2-го и 3-го), определяющих число байтов пользовательских данных L (L – число от 0 до 255, выраженное в двоичном исчислении), L байтов пользовательских данных, слова контрольной суммы кадра и одного слова окончания. Каждый байт кадра содержит стартовый, стоповый биты, бит четности и 8 битов данных.

Формат класса FT2 (класс достоверности J_2) определяет кадры с минимальным кодовым расстоянием $d_{\min} = 4$ и может использоваться для передачи фиксированного или переменного числа байтов пользовательских данных L . Структура кадра формата FT2 с фиксированным числом байтов пользовательских данных L представлена на рис. 4.12. Как видно из рисунка, кадр содержит байт стартовой комбинации и байты пользовательских данных, дополняемых контрольной последовательностью, состоящей из одного байта, следующего после каждого блока из 15 байтов пользовательских данных. Контрольная последовательность (7 битов) формируется циклическим кодом с образующим полиномом $P(X) = X^7 + X^6 + X^5 + X^2 + 1$, дополняемым одним битом четности, на все биты блока. Допускается укороченная версия формата FT2, в которой информационное поле уменьшается степенями по байту до минимальной длины информационного поля 8 битов. Каждый байт кадра содержит 8 битов данных.

Структура кадра формата FT2 (класс достоверности J_2) с переменным числом байтов пользовательских данных L аналогична показанной на рис. 4.12. Отличие заключается в наличии дополнительного блока данных (заголовок кадра), который включается вместо байта стартовой комбинации кадра (см. рис. 4.13). Заголовок кадра содержит до 15 байтов данных и включает байт, в котором указывается значение L , определяющее число байтов пользовательских данных в «теле» кадра.

Формат класса FT3 (класс достоверности J_3) определяет кадры с минимальным кодовым расстоянием $d_{\min} = 6$ и может использоваться для передачи фиксированного или переменного числа байтов пользовательских данных L .

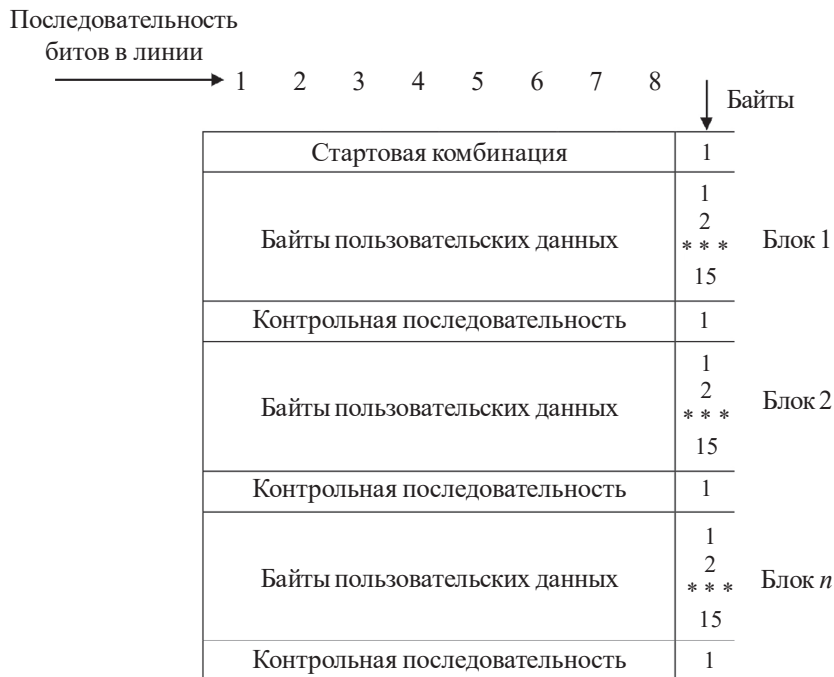


Рис. 4.12. Структура кадра формата FT2 фиксированной длины

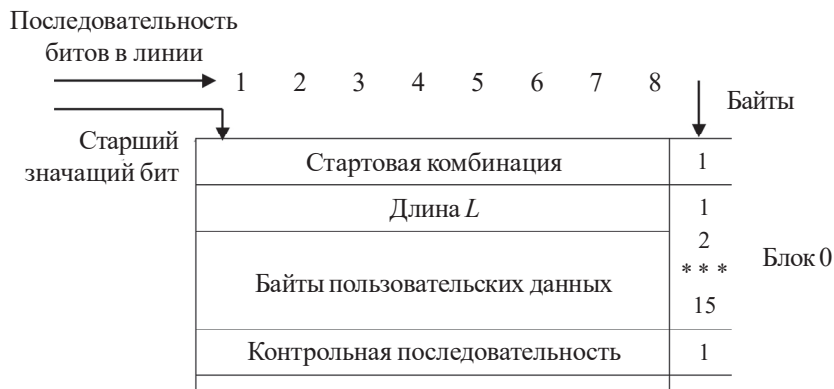


Рис. 4.13. Структура заголовка кадра формата FT2 переменной длины

Структура кадров формата FT3 аналогична структурам, показанным на рис. 4.12 и 4.13 со следующими отличиями:

- стартовая комбинация кадра содержит два байта;
- блоки данных кадра содержат до 16 байтов данных. Допускается укороченная версия формата FT3, в которой информационное поле уменьшается степенями по байту до минимальной длины информационного поля 8 битов;
- каждый блок данных кадра дополняется контрольной последовательностью, состоящей из двух байтов (16 битов), формируемой циклическим кодом с образующим полиномом $P(X) = X^{16} + X^{13} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 + X^5 + X^2 + 1$;
- каждый байт кадра содержит 8 битов данных.

Кадры пользовательских данных формата FT1.1 (класс достоверности J_1) предназначены для передачи информации в системах с низкими требованиями к достоверности данных.

Кадры пользовательских данных формата FT1.2 и формата FT2 (класс достоверности J_2) предназначены для систем с более высокими требованиями к достоверности данных. Кадры формата FT3 (класс достоверности J_3) пригодны для систем с особо высокими требованиями к достоверности данных (см. табл. 4.5).

В качестве примера практического влияния качества канала связи на достоверность принимаемых данных можно указать работу [60], в которой экспериментально исследовалась передача измерительной информации от счетчика электрической энергии типа СЭТ-4ТМ.03 к ПЭВМ в зашумленном с помощью специального генератора шума цифровом канале передачи измерительной информации. Опрос данных профиля нагрузки счетчика проводился с помощью стандартной программы «Конфигуратор СЭТ-4ТМ», использующей MODBUS-подобный протокол обмена, защищенный от искажений с помощью двухбайтной циклической контрольной суммы. Как показали измерения, при невысоком уровне шума измерительная информация принимается практически без искажений. Для достаточно высокого уровня шума количество необнаруженных ошибок в передаваемой информации быстро растет.

**Пример оценки методической составляющей
погрешности измерения электрической энергии,
обусловленной цифровым алгоритмом
обработки данных статического счетчика
электрической энергии,
в системе графического программирования LabVIEW**

Рассмотрим пример использования метода аттестации с использованием моделей исходных данных для оценки методической составляющей погрешности результата измерения, возникающей при обработке экспериментальных данных с использованием цифрового алгоритма, применяемого в ряде серийных статических счетчиков электрической энергии.

П.1. Измерительная часть статического счетчика строится на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП), осуществляющего измерение мгновенных значений аналоговых сигналов напряжения и тока, поступающих на его входы, преобразование их в цифровой вход и обработку полученных результатов с помощью встроенного в счетчик микропроцессора.

Среднеквадратичные значения переменного синусоидального напряжения U_d и тока I_d , действующие в электрической сети, к которой подключен статический счетчик, определяются соотношениями:

$$U_d = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2 \sin^2 2\pi f t \cdot dt} = \frac{U}{\sqrt{2}}; \quad (\text{П.1.1})$$

$$I_d = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 \sin^2(2\pi f t - \varphi) dt} = \frac{I}{\sqrt{2}}, \quad (\text{П.1.2})$$

где U , В, и I , А – амплитуды напряжения и тока в цепи соответственно; f – частота сети, Гц; $T = 1/f$ – период колебаний тока

в цепи, с; φ – угол фазового сдвига между напряжением и током в цепи, рад.

Средние за период сети значения активной P , полной S и реактивной Q мощности в электрической сети, к которой подключен статический счетчик, определяются соотношениями:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U \sin \omega t \cdot I \sin(\omega t - \varphi) dt =$$

$$= \frac{1}{2} U I \cos \varphi, \text{ Вт}; \quad (\text{П.1.3})$$

$$S = \frac{1}{2} UI, \text{ В} \cdot \text{А}; \quad (\text{П.1.4})$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \frac{1}{2} UI \sin \varphi, \text{ вар}. \quad (\text{П.1.5})$$

П.2. Простейший алгоритм обработки результатов измерений, реализованный, в частности, в статических счетчиках электрической энергии типа СЭТ-4ТМ.02 (ГР № 20175) и СЭТ-4ТМ.03 (ГР № 27524), использует следующую аппроксимацию представленных в (П.1.3) – (П.1.5) уравнений измерения средних за период сети значений активной P_a , полной S_a и реактивной Q_a мощности:

$$P_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{ai} \cdot I_{ai}, \text{ Вт}; \quad (\text{П.2.1})$$

$$S_a = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n U_{ai}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{ai}^2}, \text{ В} \cdot \text{А}; \quad (\text{П.2.2})$$

$$Q_a = \sqrt{S_a^2 - P_a^2}, \text{ вар}, \quad (\text{П.2.3})$$

где U_{ai} , I_{ai} – мгновенные значения напряжения и тока в цепи, измеренные с помощью АЦП счетчика в режиме когерентной выборки [61], для которого частота квантования сигнала по времени

$f_{\text{кв}}$ кратна частоте исследуемого сигнала f , $n = f_{\text{кв}} / f$ – число выборок за период сети.

На основании указанных выше измеренных значений мощности микропроцессор счетчика вычисляет средние за интервал времени $\tau_1 = 1$ с значения активной P_{a1} , Вт, полной S_{a1} , В·А, и реактивной Q_{a1} , вар, мощности. Значение средней активной мощности P_{a1} определяют с помощью соотношения

$$P_{a1} = \frac{1}{50} \sum_{j=1}^{50} P_a(j), \quad (\text{П.2.4})$$

где $P_a(j)$ – средние за период сети значения активной мощности, измеренные за j -й период колебаний сети ($j = 1, 2, \dots, 50$), входящий в рассматриваемый интервал времени τ_1 .

Вычисление средних за интервал времени τ_1 значений полной S_{a1} , В·А, и реактивной Q_{a1} , вар, мощности проводят с помощью аналогичных (П.2.4) соотношений при заданных в (П.2.2) и (П.2.3) средних за период сети значениях полной $S_a(j)$ и реактивной $Q_a(j)$ мощности, измеренных за j -й период колебаний сети ($j = 1, 2, \dots, 50$), входящий в рассматриваемый интервал времени τ_1 .

Полученные указанным способом значения активной P_{a1} , полной S_{a1} и реактивной мощности Q_{a1} используются в дальнейшей работе счетчика для вычисления активной и реактивной энергии и мощности на интервалах времени длительностью от 2 до 60 мин, устанавливаемых с дискретностью 1 с при программировании счетчика.

П.3. При оценке методической составляющей погрешности измерений с использованием моделей исходных данных будем придерживаться определенной в разд. 2.4.3 последовательности выполнения этапов работ:

Этап 1. Критерии соответствия аттестуемого ПО предъявляемым требованиям.

При определении критериев оценки соответствия аттестуемого ПО предъявляемым требованиям будем ориентироваться на многофункциональный статический счетчик класса точности 0,2S/0,5.

В номинальном режиме эксплуатации такого счетчика относительная погрешность измерения активной / реактивной энергии и мощности не должна превышать соответственно 0,2 / 0,5 %. Это значит, что методические составляющие погрешности результата измерения активной и реактивной энергии $\delta_{МЭ}$ и мощности $\delta_{ММ}$, обусловленные цифровым алгоритмом обработки данных указанного счетчика, должна быть по абсолютной величине много меньше указанного выше значения погрешности измерения активной энергии:

$$|\delta_{МЭ}|, |\delta_{ММ}| \ll 0,2 \%. \quad (\text{П.3.1})$$

Этап 2. Основные оцениваемые характеристики ПО.

В качестве характеристик соответствия аттестуемого ПО предъявляемым требованиям выбираем методические составляющие погрешности измерения $\delta_{МЭ}$ и $\delta_{ММ}$, которые определяются:

- частотой квантования сигнала по времени $f_{\text{кв}}$ (числом выборок за период сети $n = f_{\text{кв}} / f$);
- погрешностью квантования сигнала по уровню $\Delta_{\text{кв}}$, обусловленной отличием амплитуды сигнала на выходе АЦП от его фактического значения, что приводит [62] к т. н. шумам квантования;
- значением угла фазового сдвига φ между напряжением и током в цепи.

Этап 3. Определение набора моделей исходных данных.

Для оценки значений составляющих погрешности измерения $\delta_{МЭ}$ и $\delta_{ММ}$ используем набор исходных данных, который включает:

- номинальные значения амплитуды входного напряжения $U_{\text{ном}}$, В, и силы тока $I_{\text{ном}}$, А;
- фактические значения амплитуды входного напряжения U , В, и силы тока I , А;
- частоту синусоидальных сигналов тока и напряжения $f = 50$ Гц;
- число выборок за период сети n ;
- значения угла фазового сдвига φ в диапазоне $-60^\circ \leq \varphi \leq 60^\circ$ ($|\cos \varphi| \geq 0,5$) для активной энергии и мощности, и $30^\circ \leq |\varphi| \leq 90^\circ$ ($|\sin \varphi| \geq 0,5$) для реактивной энергии и мощности;

• погрешность квантования сигнала по уровню $\Delta_{\text{кв}}$ считаем случайной, равномерно распределенной величиной, плотность распределения которой $P(\Delta_{\text{кв}})$ имеет вид:

$$P(\Delta_{\text{кв}}) = 1/h \text{ при } |\Delta_{\text{кв}}| \leq 0,5h; \quad (\text{П.3.2a})$$

$$P(\Delta_{\text{кв}}) = 0 \text{ при } |\Delta_{\text{кв}}| > 0,5h. \quad (\text{П.3.2б})$$

Здесь h – шаг квантования по уровню (расстояние между соседними уровнями квантования). При равномерном квантовании ($h = \text{const}$) шаг квантования по уровню определяется соотношением [62]:

$$h = \frac{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}{2^N},$$

где $(x_{\text{max}} - x_{\text{min}})$ – диапазон измерения АЦП; x_{max} и x_{min} – соответственно максимальное и минимальное значения измеряемой величины; 2^N – общее число дискретных сообщений, которое может сформировать двоичный АЦП разрядностью N ($N = 12, 14, 16 \dots$).

Для синусоидального входного сигнала с номинальным значением амплитуды $X_{\text{ном}}$ шаг квантования h определяется соотношением

$$h = \frac{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}{2^N} = \frac{2X_{\text{ном}}}{2^N} = \frac{X_{\text{ном}}}{2^{N-1}}. \quad (\text{П.3.3})$$

Этап 4. Оценка методических составляющих погрешности измерения $\delta_{\text{мэ}}$ и $\delta_{\text{мм}}$

Для оценки значений $\delta_{\text{мэ}}$ и $\delta_{\text{мм}}$ используется виртуальная модель однофазного статического счетчика электрической энергии, созданная в системе графического программирования LabVIEW (англ. Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench – среда разработки лабораторных виртуальных приборов) компании National Instruments [63]. Наиболее развитыми и популярными версиями LabVIEW являются версии, предназначенные для использования на ПЭВМ, работающих под управлением Microsoft Windows.

Описание виртуальной модели счетчика

Виртуальная модель однофазного статического счетчика электрической энергии, как и любая программа LabVIEW, называется и является виртуальным прибором (ВП) и состоит из двух частей:

- **лицевой панели**, описывающей пользовательский интерфейс ВП и называемой так потому, что имитирует лицевую панель традиционного прибора;

- **блоков-диаграммы**, описывающей логику работы ВП и представляющей исходный программный код, созданный на языке графического программирования LabVIEW.

При запуске программы на экране ПЭВМ открывается лицевая панель ВП, представленная на рис. П.1. В левой части лицевой панели расположена колонка элементов управления работой ВП. Верхние девять элементов управления в этой колонке позволяют задавать:

- частоту электрического тока f , Гц;
- номинальные и фактические амплитудные значения напряжения U , В, и силы тока I , А;
- сдвиг фаз между током и напряжением φ , град.;
- число выборок за период сети n ;
- разрядность АЦП счетчика N ;
- время измерения энергии, с.

Последний, десятый элемент в колонке представляет собой кнопку запуска ВП.

Для вывода результатов моделирования в верхней части лицевой панели размещены 18 элементов индикации Numeric indicator по 6 элементов в ряду и три элемента Waveform graph. Отображаемая каждым элементом информация указана в надписи над элементом.

В верхней части экрана ПЭВМ, содержащей лицевую панель ВП, располагается главное меню с пунктами File, Edit, View, Project, Operate, Tools, Windows и Help. Ниже главного меню расположена инструментальная панель, служащая для запуска и редактирования ВП. В частности, кнопки инструментальной панели, обозначенные цифрами 1 и 2 на рис. П.1, используются для непрерывного запуска и остановки ВП соответственно.

Частота, Гц: 50

Номинальная амплитуда напряжения, В: 220

Фактическое напряжение, В: 220

Номинальное значение сопротивления, А: 5

Фактическое значение сопротивления, А: 5

Средняя фаза: 6

Кол-во точек на период: 100

Разрешение: 5

Время, с: 5

Запуск

1

2

Полная мощность, ВА: 769,578

Активная мощность, Вт: 755,76

Реактивная мощность, ВАР: 80,454

СКО полной мощности, %: 0,024

СКО активной мощности, %: 0,025

СКО реактивной мощности, %: 0,033

Отклонение полной мощности, %: -0,003

Отклонение активной мощности, %: -0,005

Отклонение реактивной мощности, %: -0,004

Полная энергия: 3949,97

Активная энергия: 3828,97

Реактивная энергия: 402,454

СКО полной энергии, %: 0,004

СКО активной энергии, %: 0,004

СКО реактивной энергии, %: 0,016

Отклонение полной энергии, %: -0,001

Отклонение активной энергии, %: -0,001

Отклонение реактивной энергии, %: -0,005

Осциллограмма напряжения

Рис. 0

Осциллограмма силы электрического тока

Рис. 0

Среднеарифметическое значение напряжения, В

Частота, Гц

Рис. П.1.1. Лицевая панель ВП

Для перехода от лицевой панели к блок-диаграмме ВП, показанной на рис. П.2, служит пункт главного меню Window → Show Block Diagram.

Блок-диаграмма условно может быть разделена на четыре области:

- область 1 – управление генераторами;
- область 2 – генерация сигналов и расчет мгновенных значений параметров мощности;
- область 3 – расчет значений параметров энергии за интервал времени;
- область 4 – вывод результатов.

В области 1 блок-диаграммы – области управления генераторами слева от цикла While расположены все элементы управления, представленные на передней панели. Для задания количества точек на период в сигнале генераторов на вход Sampling info каждого генератора подаются данные типа кластер, содержащие информацию о количестве сэмплов в секунду и количестве сэмплов в сигнале. Для простоты оба значения определяются произведением частоты и количества точек на период. После расчета произведения (Multiply) одинаковые значения преобразуются в тип данных кластер посредством Bundle Function и передаются в таком виде на генераторы. Разрядность АЦП задается в соответствии с соотношениями (П.3.2) и определяет режим работы генераторов равномерного шума.

Генерация сигналов (область 2 блок-диаграммы) выполняется в цикле For для возможности «измерения» мощности за различные интервалы времени. Используются два генератора Sine Waveform и два генератора Uniform White Noise Waveform. К первым двум генераторам необходимо подвести значения амплитуды, частоты и фазового сдвига. К генераторам шума достаточно подвести только шаг квантования h , определяемый в соответствии с соотношениями (П.3.2). Подключением кластера с информацией о сэмплировании обеспечивается моделирование конечности частоты дискретизации АЦП счетчика. Соединение различных элементов производится путем подведения курсора к одному из выводов

элемента блок-диаграммы, однократного нажатия левой кнопки мыши, подведения ко второму выводу, с которым необходимо соединить первый, и повторного нажатия левой кнопки мыши.

Расчет значений активной, реактивной и полной мощности и энергии (область 3 блок-диаграммы) осуществляется в соответствии с соотношениями (П.1.3) – (П.1.5) за рамкой цикла For. Для перевода фазового сдвига φ , вводимого в ВП в градусах, в радианы введенное значение делится на $(180/\pi)$.

В области расчета внутри цикла For сигнал измеряемого напряжения складывается из гармонического и напряжения шума. Три сумматора элементов массива используются для численного интегрирования сигналов. Деление на период фактически позволяет определить среднюю мощность за период, а не за все время следования сигнала. Весь расчет осуществляется в соответствии с соотношениями (П.2.1) – (П.2.3).

Расчет статистических показателей производится после генерации сигналов и их накопления в массивы. Для простоты написания программы в этой части не были использованы локальные переменные, что несколько затрудняет прямое повторение блок-схемы и требует понимания при расчете статистических характеристик.

ВП рассчитывает и выводит следующие характеристики измеренной мощности:

- средние за интервал времени $\tau_1 = 1$ с значения активной P_{a1} , полной S_{a1} и реактивной Q_{a1} мощности, полученные согласно (П.2.4);
- среднее квадратическое отклонение (СКО) [1] $\sigma_1(P_a)$ для множества измеренных за интервал времени τ_1 значений активной $P_a(j)$ мощности, представленных в (П.2.1), а также СКО полной $\sigma_1(S_a)$ или реактивной $\sigma_1(Q_a)$ мощности, нормированные на соответствующее среднее значение активной P_{a1} , полной S_{a1} и реактивной Q_{a1} мощности. Значение $\sigma_1(P_a)$ определяют с помощью соотношения

$$\sigma_1(P_a) = \frac{1}{P_{a1}} \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{50} (P_a(j) - P_{a1})^2}{49}} \cdot 100 \% \quad (\text{П.3.4})$$

Вычисление значений $\sigma_1(S_a)$ и $\sigma_1(Q_a)$ проводят с помощью аналогичных (П.3.4) соотношений при заданных в (П.2.2) и (П.2.3) средних за период сети значениях полной $S_a(j)$ и реактивной $Q_a(j)$ мощности, измеренных за j -й период колебаний сети ($j = 1, 2, \dots, 50$), входящий в рассматриваемый интервал времени τ_1 ;

- относительное отклонение δP_{a1} средней активной мощности P_{a1} , измеренной за интервал времени τ_1 , от действительного значения этой мощности P , которое представлено в (П.1.3), а также относительные отклонения средней полной δS_{a1} и реактивной δQ_{a1} мощности от действительного значения полной S или реактивной Q мощности, представленных в (П.1.4) и (П.1.5) соответственно. Значение δP_{a1} представляет собой определенную выше методическую составляющую погрешности измерения активной мощности δ_{MM} и определяется с помощью соотношения

$$\delta P_{a1} = \left(\frac{P_{a1}}{P} - 1 \right) \cdot 100 \%. \quad (\text{П.3.5})$$

Вычисление значений S_{a1} и Q_{a1} проводят с помощью аналогичных (П.3.5) соотношений.

Характеристики измеренной энергии:

- значения активной $W_{Pa}(\tau_k)$, Вт · с, полной $W_{Sa}(\tau_k)$, ВА · с, и реактивной $W_{Qa}(\tau_k)$, вар · с, энергии, измеренные за интервал времени $\tau_k = K$ с. Значение $W_{Pa}(\tau_k)$ определяют с помощью соотношения

$$W_{Pa}(\tau_k) = \tau_1 \cdot \sum_{k=1}^K P_{a1k}, \quad (\text{П.3.6})$$

где P_{a1k} – значение активной мощности, рассчитанной согласно (П.2.4) за k -й интервал времени длительностью $\tau_1 = 1$ с, входящий в рассматриваемый интервал времени $\tau_k = K$, где $k = 1, 2, \dots, K$. Вычисление значений $W_{Sa}(\tau_k)$ и $W_{Qa}(\tau_k)$ проводят с помощью аналогичных (П.3.6) соотношений;

- среднее квадратическое отклонение $\sigma_k(W_{Pa})$ множества измеренных за интервал времени τ_k значений активной энергии $W_{Pa1k} = \tau_1 \cdot P_{a1k}$, а также СКО полной $\sigma_k(W_{Sa})$ или реактивной $\sigma_k(W_{Qa})$ энергии, нормированное на соответствующее значение активной

$W_{Pa}(\tau_k)$, полной $W_{Sa}(\tau_k)$ или реактивной $W_{Qa}(\tau_k)$ энергии. Значение $\sigma_k(W_{Pa})$ определяют с помощью соотношения

$$\sigma_k(W_{Pa}) = \frac{1}{W_{Pa}(\tau_k)} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (W_{Pa1k} - \bar{W}_{Pa1k})^2}{K-1}} \cdot 100 \%, \quad (\text{П.3.7})$$

где $\bar{W}_{Pa1k} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K W_{Pa1k}$ – среднее значение активной энергии для множества значений активной энергии W_{Pa1k} ($k = 1, 2, \dots, K$), измеренных за интервалы времени $\tau_1 = 1$ с, входящие в рассматриваемый интервал времени τ_k .

Вычисление значений $\sigma_k(W_{Sa})$ и $\sigma_k(W_{Qa})$ проводят с помощью аналогичных (П.3.7) соотношений;

- относительное отклонение δW_{Pa} активной энергии $W_{Pa}(\tau_k)$, измеренной за интервал времени τ_k , от действительного значения этой энергии $W_P = \tau_k P$, где значение P представлено в (П.1.3), а также относительные отклонения полной δW_{Sa} и реактивной δW_{Qa} энергии от действительного значения полной $W_S = \tau_k S$ или реактивной $W_Q = \tau_k Q$ энергии, где значения S и Q представлены в (П.1.4) и (П.1.5) соответственно. Значение δW_{Pa} представляет собой определенную выше методическую составляющую погрешности измерения активной энергии $\delta_{MЭ}$ и определяется с помощью соотношения

$$\delta W_{Pa} = \left(\frac{W_{Pa}(\tau_k)}{W_P} - 1 \right) \cdot 100 \%. \quad (\text{П.3.8})$$

Вычисление значений δW_{Sa} и δW_{Qa} проводят с помощью аналогичных (П.3.8) соотношений.

В области вывода результатов (область 4 блок-диаграммы) расположены элементы вывода полученных в результате работы ВП результатов. Для масштабирования графиков в графическом окне целесообразно активировать соответствующую функцию, для чего необходимо переключиться на переднюю панель ВП и щелкнуть по Waveform Graph правой кнопкой мыши, в ниспадающем меню

выбрать пункт Properties и во всплывающем окне поставить галочку напротив пункта Show graph legend. При этом в нижней части окна Waveform Graph появится небольшая панель, позволяющая изменять масштаб выводимого графика. Для возможности ручного изменения масштаба необходимо отключить автомасштабирование, щелкнув правой кнопкой мыши по Waveform Graph и сняв галочки напротив пунктов AutoScale X и Autoscale Y.

Вариант False (рис. П.3) структуры Case structure содержит в себе локальные переменные, которые при каждом выполнении цикла перезаписываются. Расчет выполняется по нажатию кнопки «Запуск» (см. рис. П.1).

Порядок работ с виртуальным прибором

При подготовке ВП к работе необходимо нажать кнопку 1 на инструментальной панели (рис. П.1). Запуск вычислений осуществляется кнопкой «Запуск» на передней панели ВП.

Вводим с помощью элементов управления на передней панели ВП (рис. П.1) значения характеристик входных сигналов $U_{\text{ном}}$, U , $I_{\text{ном}}$, I , f , φ .

Задаем разрядность АЦП N и число выборок за период сети n .

Вычисляем для $\tau_1 = 1$ с с помощью ВП значения активной P_{a1} , полной S_{a1} и реактивной Q_{a1} мощности, а также СКО (формула (П.3.4)) и относительные отклонения рассчитанных значений мощности (формула (П.3.5)).

Вычисляем для $\tau_k = 120$ с с помощью ВП значения активной $W_{Pa}(\tau_k)$, полной $W_{Sa}(\tau_k)$ и реактивной $W_{Qa}(\tau_k)$ энергии, а также СКО (формула (П.3.7)) и относительные отклонения рассчитанных значений энергии (формула (П.3.8)).

Полученные результаты расчетов удобно регистрировать в форме приведенных ниже таблиц, в которых в качестве примера представлены результаты расчетов при номинальной и минимальной измеряемых мощности и энергии. Прочерки в отдельных клетках этих таблиц соответствуют значениям фазового угла φ , для которого соответствующая мощность и энергия не определены.



Рис. П.3. Вариант False структуры Case structure

Т а б л и ц а П.1

Номинальные значения измеряемых мощности и энергии

φ°	Время измерения 1 с				Время измерения 120 с			
	Активная мощность		Реактивная мощность		Активная энергия		Реактивная энергия	
	P_{a1} , Вт	δP_{a1} , %	Q_{a1} , вар	δQ_{a1} , %	$W_{ra}(\tau_k)$, Вт · с	δW_{ra} , %	$W_{Qa}(\tau_k)$, вар · с	δW_{Qa} , %
0	550,011	0,002	—	—	66 000,000	0,000	—	—
30	476,300	−0,003	274,998	−0,001	57 157,600	0,000	32 999,900	0,000
60	275,015	0,005	476,329	0,003	32 999,900	0,000	57 157,600	0,000
90	—	—	549,992	−0,001	—	—	65 999,900	0,000

Примечание. При расчетах были заданы параметры: АЦП $N = 12; n = 40; f = 50 \text{ Гц}; U_{ном} = U = 220 \text{ В}; I_{ном} = I = 5 \text{ А}; S = 550 \text{ В} \cdot \text{А}.$

Т а б л и ц а П.2

Минимальные значения измеряемых мощности и энергии

φ°	Время измерения 1 с			Время измерения 120 с		
	Активная мощность		Реактивная мощность	Активная энергия		Реактивная энергия
	$P_{a1}, \text{ Вт}$	$\delta P_{a1}, \%$		$W_{Pa}(\tau_k), \text{ Вт} \cdot \text{ с}$	$W_{Pa}(\tau_k), \text{ вар} \cdot \text{ с}$	$\delta W_{Qa}, \%$
0	22,009	0,043	—	2 639,900	—	—
30	19,058	0,029	11,005	2 286,350	1 320,160	0,012
60	10,995	0,049	19,061	1 320,080	2 286,440	0,006
90	—	—	22,005	—	2 640,120	0,005

Примечание. При расчетах были заданы параметры: АЦП $N = 12$; $n = 40$; $f = 50 \text{ Гц}$; $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$; $U = 176 \text{ В}$; $I_{\text{ном}} = 5 \text{ А}$; $I = 0,25 \text{ А}$; $S = 22 \text{ В} \cdot \text{ А}$.

Этап 5. Оценка полученных результатов.

Как видно из табл. П.1, при номинальных значениях измеряемых мощности и энергии относительные отклонения рассчитанных значений мощности и энергии незначительно отличаются от действительных значений этих величин. Иначе говоря, в этом случае методические составляющие погрешности результата измерения активной и реактивной энергии МЭ и мощности ММ пренебрежимо малы.

При минимальных значениях измеряемых мощности и энергии, соответствующих указанным в табл. П.2 значениям амплитуды напряжения U и силы тока I , относительные отклонения рассчитанных значений мощности и энергии существенно возрастают, но, тем не менее, остаются примерно в 4 раза меньше указанного в (П.2.5) значения 0,2 %. Иначе говоря, и в этом случае при выбранных значениях разрядности АЦП N и числа выборок за период сети n влиянием методических составляющих погрешности результата измерения значений активной и реактивной энергии $\delta_{МЭ}$ и мощности $\delta_{ММ}$ можно пренебречь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. РМГ 29-2013. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.
2. Кузнецов В. А., Ялунина Г. Я. Метрология (теоретические, прикладные и законодательные основы) : учеб. пособие. М. : ИПК Изд-во стандартов, 1998.
3. ГОСТ 30012.1-2002. Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Ч. 1. Определения и основные требования, общие для всех частей.
4. Вострокнутов Н. Н. Поверка и калибровка измерительных преобразователей электрических величин : конспект лекций. М. : АСМС, 2012.
5. ГОСТ Р 8.596-2002. ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.
6. ГОСТ 8.417-2002. ГСИ. Единицы величин.
7. ГОСТ Р 8.736-2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.
8. ГОСТ Р МЭК 870-5-1-95. Устройства и системы телемеханики. Ч. 5. Протоколы передачи. Разд. 1. Форматы передаваемых кадров.
9. ГОСТ 21128-83. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В.
10. ГОСТ Р 54500.3-2011. Неопределенность измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.
11. ПМГ 96-2009. ГСИ. Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления.
12. РМГ 91-2009. ГСИ. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы.
13. ГОСТ 8.401-80. ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.
14. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
15. Методический материал по применению ГОСТ 8.009-84 «ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений».
16. ГОСТ Р 51840-2001. Программируемые контроллеры. Общие положения и функциональные характеристики.
17. Автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электрической энергии (мощности). Технические

требования: Приложение 11.1 к Положению о порядке получения статуса субъекта оптового рынка и ведения реестра субъектов оптового рынка.

18. ПНСТ 159-2016. Автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электрической энергии. Общие технические условия.

19. ГОСТ 8.567-2014. ГСИ. Измерения времени и частоты. Термины и определения.

20. *Борисочкин В., Казан С., Черенков Г.* Эталонные сигналы частоты и времени // Радио. 2000. № 2.

21. Положение о Государственной службе времени, частоты и определения параметров вращения Земли: утв. Постановлением Правительства РФ № 225 от 23.01.2001 г.

22. ГОСТ 8.515-2016. ГСИ. Эталонные сигналы частоты и времени, излучаемые специализированными радиостанциями Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли. Временной код.

23. *Одуан К., Гино Б.* Измерение времени. Основы GPS. М. : Техносфера, 2002 .

24. ГОСТ 22261-94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия.

25. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

26. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

27. ГОСТ Р 50397-2011. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения.

28. ГОСТ Р 51318.22-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от оборудования информационных технологий. Нормы и методы испытаний.

29. ГОСТ 30804.4.2-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний.

30. ГОСТ 30804.4.4-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний.

31. ГОСТ Р 51317.4.3-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний.

32. ГОСТ 30804.4.11-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к провалам, кратковременным прерываниям и изменениям напряжения электропитания. Требования и методы испытаний.

33. ГОСТ 27201-87. Машины вычислительные электронные персональные. Типы, основные параметры, общие технические требования.

34. Гук М. Ю. Аппаратные средства IBM PC : энциклопедия. 3-е изд. СПб. : Питер, 2006.

35. ГОСТ Р 8.654-2015. ГСИ. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения.

36. ГОСТ Р 8.839-2013. ГСИ. Общие требования к измерительным приборам с программным управлением.

37. МИ 3286-2010. Проверка защиты программного обеспечения и определение ее уровня при испытаниях средств измерений в целях утверждения типа.

38. Кудяров Ю. А. Испытания (тестирование) программного обеспечения средств измерений : учеб. пособие. М. : АСМС, 2010.

39. OIML D 31:2008. General requirements for software controlled measuring instruments (Общие требования к измерительным приборам с программным управлением).

40. WELMEC 7.2, Issue 5. Software Guide (Measuring Instruments Directive 2004/22/EC), March 2012 (Руководство по программному обеспечению (Директива по измерительным приборам 2004/22/EC), март 2012).

41. Слаев В. А., Чуновкина А. Г. Аттестация программного обеспечения, используемого в метрологии : справ. книга / под ред. В. А. Слаева. СПб. : Профессионал, 2009.

42. МИ 2174-91. ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения.

43. МИ 2955-2010. ГСИ. Типовая методика аттестации программного обеспечения средств измерений.

44. ГОСТ 17657-79. Передача данных. Термины и определения.

45. Воройский Ф. С. Информатика. Новый систематизированный толковый словарь-справочник (Введение в современные информационные и телекоммуникационные технологии в терминах и фактах). 3-е изд., перераб. и доп. М. : Физматлит, 2003.

46. Игнатов В. А. Теория информации и передачи сигналов : учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1991.

47. ГОСТ 26.011-80. Средства измерений и автоматизации. Сигналы тока и напряжения электрические непрерывные входные и выходные.

48. ГОСТ 26.010-80. Средства измерений и автоматизации. Сигналы частотные электрические непрерывные входные и выходные.

49. ГОСТ 26.013-81. Средства измерений и автоматизации. Сигналы электрические с дискретным изменением параметров входные и выходные.

50. ГОСТ 26.012-94. Приборы и средства автоматизации. Сигналы гидравлические входные и выходные.

51. ГОСТ 26.015-81. Средства измерений и автоматизации. Сигналы пневматические входные и выходные.

52. Митюшкин К. Г. Телеконтроль и телеуправление в энергосистемах. М. : Энергоатомиздат, 1990.

53. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 4 : Кинетика, теплота, звук. Гл. 40 : Принципы статистической механики. М. : Изд-во «Мир», 1977.

54. ГОСТ 26.205-88. Комплексы и устройства телемеханики. Общие технические условия.

55. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1968.

56. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Ч. 1. Базовая модель.

57. Гук М. Аппаратные средства локальных сетей : энциклопедия. СПб. : Изд-во «Питер», 2000.

58. ГОСТ Р МЭК 870-1-4-98. Устройства и системы телемеханики. Ч. 1. Основные положения. Разд. 4. Основные аспекты передачи телемеханических данных и руководство по использованию стандартов МЭК 870-5 и МЭК 870-6.

59. ГОСТ 26.014-81. Средства измерений и автоматизации. Сигналы электрические кодированные входные и выходные.

60. Захаров В. А., Поздеева Т. Ю., Невзоров А. Л. Ошибки информационного обмена в цифровых каналах передачи информации измерительных систем // Метрология. 2013. № 7.

61. Вьюхин В. Н., Попов Ю. А., Тани Ю. Л. Исследование метода когерентной выборки для тестирования высокоразрядных АЦП // Автометрия: 1997. № 5.

62. Топильский В. Б. Схемотехника аналого-цифровых преобразователей : учеб. издание. М. : Техносфера, 2014.

63. Тревис Дж. LabVIEW для всех / пер. с англ. Н. А. Клушина. М. : ДМК Пресс : ПриборКомплект, 2005.

Учебное издание

Захаров Владимир Алексеевич
Волегов Алексей Сергеевич

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Учебное пособие

В двух частях

Часть 1

Принципы построения и вопросы стандартизации
автоматизированных измерительных систем

Заведующий редакцией *М. А. Овечкина*

Редактор *С. Г. Галинова*

Корректор *С. Г. Галинова*

Компьютерная верстка *Г. Б. Головина*

Подписано в печать 06.11.18. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Цифровая печать.

Уч.-изд. л. 8,1. Усл. печ. л. 9,77. Тираж 40 экз. Заказ 192.

Издательство Уральского университета.

Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ

620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.

Тел.: +7 (343) 389-94-79, 350-43-28

E-mail: gio.marina.ovechkina@mail.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ

620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.

Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13

Факс +7 (343) 358-93-06

<http://print.urfu.ru>

